THE LIBRARY
BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY
PROVO, UTAH

Digitized by the Internet Archive
in 2012 with funding from
Brigham Young University

http://www.archive.org/details/derschallautoris00tynd

DER SCHALL.

Holzstiche

aus dem xylographischen Atelier

von Friedrich Vieweg und Sohn

in Braunschweig.

ML
3805
.T96
S32x
1897

DER SCHALL

VON

JOHN TYNDALL, D.C.L., L.L.D., F.R.S.,
PROFESSOR DER PHYSIK AN DER ROYAL INSTITUTION VON GROSS-BRITANNIEN.

AUTORISIRTE DEUTSCHE AUSGABE

NACH DER

SECHSTEN ENGLISCHEN AUFLAGE DES ORIGINALS

BEARBEITET

VON

A. v. HELMHOLTZ UND CL. WIEDEMANN.

MIT 204 EINGEDRUCKTEN HOLZSTICHEN.

DRITTE AUFLAGE.

BRAUNSCHWEIG,
DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN.
1897.

Alle Rechte, namentlich jenes der Uebersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

THE LIBRARY
BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY
PROVO

DEM

ANDENKEN MEINES FREUNDES

RICHARD DAWES,

WEILAND DECAN VON HEREFORD

IST

DIESES BUCH GEWIDMET.

J. T.

VORREDE DES AUTORS
ZUR
FÜNFTEN AUFLAGE.

Die hier gegebenen Auszüge aus den Vorreden der früheren Auflagen ermöglichen es dem Leser, die geschichtliche Entwickelung des vorliegenden Werkes zu verfolgen. Ich habe jeder folgenden Auflage einen Bericht der von mir und Anderen gemachten Arbeiten hinzugefügt. Wie schon anderswo bemerkt, ist das Buch in verschiedenen Sprachen erschienen und während es einer gerechtfertigten Kritik unterzogen wurde, im Ganzen sehr gut aufgenommen. Ein Berichterstatter der französischen Uebersetzung beklagte den Mangel an Mathematik in dem Werke. Helmholtz und Wiedemann, die die Herausgabe der deutschen Uebersetzung beaufsichtigten, schrieben im Gegentheil voller Anerkennung über die Art und Weise, in der die schwierigsten Fragen der Akustik nur durch die rein experimentelle Methode behandelt wor-

den wären. Die deutschen Gelehrten hatten meine Absicht richtiger verstanden als der französische Berichterstatter. Hätte ich mathematische Entwickelungen in das Buch eingefügt, so hätte ich es von meinem Standpunkte aus zu Grunde gerichtet. Wie mein Buch über die Wärme, so sollten diese Vorlesungen über den Schall den Sinn weiterer Kreise für das Interesse und die Bedeutung und wo möglich für den zauberhaften Reiz der physikalischen Wissenschaft erwecken und gewinnen. Mein Ziel war stets ebenso sehr anzuregen, wie zu belehren.

Hind Head, April 1893.

AUSZUG AUS DER VORREDE DES AUTORS
ZUR
ERSTEN AUFLAGE.

Ich habe auf den folgenden Seiten versucht, in den gebildeten Kreisen das Interesse für die Lehre von der Akustik zu erwecken, ohne dabei eine besondere wissenschaftliche Vorbildung vorauszusetzen.

Der Gegenstand ist durchaus experimentell behandelt worden, und ich habe mich bemüht, jeden Versuch dem Leser so vorzuführen, dass er den Vorgang dabei klar vor Augen sieht. Es war mein Wunsch, charakteristische Beispiele von den verschiedenen Erscheinungen der Akustik zu geben, um so einen tieferen Einblick in ihre wahren Beziehungen unter einander zu ermöglichen.

Mehrere meiner englischen Freunde haben mich durch die mehr oder weniger vollständige Durchsicht der Druckbogen dieses Werkes verpflichtet. Meinem berühmten deutschen Freunde

Clausius, der sich der Mühe unterzog, die Bogen von Anfang bis zu Ende durchzulesen, spreche ich meinen besonderen Dank aus.

Die civilisirte Welt strebt immer mehr nach naturwissenschaftlicher Bildung. Dieses Bestreben ist natürlich und unter den obwaltenden Umständen unausbleiblich. Eine Kraft, die das geistige und materielle Schaffen unseres Zeitalters so beeinflusst, kann nicht umhin, die allgemeine Aufmerksamkeit zu fesseln und zu genauerem Studium aufzufordern. Auf unseren Schulen und Universitäten hat sich eine Bewegung zu Gunsten der Naturwissenschaften erhoben, die sicherlich dahin führen wird, dass ihre Ansprüche, sowohl eine Quelle des Wissens, wie ein Mittel zur Ausbildung des Geistes zu sein, allgemein anerkannt werden. Sollte dieses Buch einflussreichen Männern, die ihre Bildung einer andern Quelle verdanken, die Grundzüge und die Gestaltung der physikalischen Wissenschaft, wenn auch nur unvollkommen, darlegen und denjenigen, welche in die vorher erwähnte Bewegung fördernd eingreifen, eine indirecte Unterstützung gewähren, so ist es nicht vergebens geschrieben worden.

AUSZUG AUS DER VORREDE DES AUTORS
ZUR
DRITTEN AUFLAGE.

Bei der Bearbeitung dieser neuen Auflage des „Schalls“ bin ich die letzte sehr aufmerksam durchgegangen, habe so viel als möglich ihre Mängel in Styl und Inhalt verbessert und zu gleicher Zeit die grösstmögliche Rücksicht auf die Kritik und die Rathschläge genommen, die die früheren Auflagen hervorgerufen hatten.

Es waren nur wenige Fälle, in denen ich mich begnügte, das wiederzugeben, was ich in den Arbeiten der Akustiker gelesen hatte. Ich suchte mich experimentell mit der Grundlage der Beobachtungen vertraut zu machen und bemühte mich in allen Fällen, die Erklärungen in der für Unterrichtszwecke geeignetsten Form und Verbindung zu geben.

Obgleich das Werk einen guten Theil der Unvollkommenheit an sich hat, die allen menschlichen Bemühungen anhaftet, so hat es doch

seinen Weg in die Literatur verschiedener Nationen von verschiedenen geistigen Anlagen gefunden. Eine neue deutsche Auflage wurde voriges Jahr unter der Leitung von Helmholtz und Wiedemann herausgegeben. Dass so bedeutende Gelehrte, die so mit Berufsgeschäften überladen sind, sich noch der Arbeit unterziehen, jeden Druckbogen eines solchen Werkes zu prüfen und zu corrigiren, zeigt, dass sie es als das ansehen, was es sein möchte — ein ernstgemeinter Versuch, die Kenntniss der Wissenschaft in weiteren Kreisen zu fördern. Es ist für mich besonders erfreulich, dass ich danach die Ueberzeugung haben kann, dass nicht nur in England das Buch einem allgemeinen Bedürfniss abgeholfen hat, sondern auch in dem gelehrten Lande, dem ich meine wissenschaftliche Erziehung verdanke.

Juni 1875.

VORREDE DES AUTORS
ZUR
VIERTEN AUFLAGE.

Verschiedene Zusätze und Verbesserungen sind in dieser Auflage des „Schalls“ gemacht worden.

Ich überreichte voriges Jahr der Royal Society eine längere Abhandlung über „Der Einfluss der freien Moleküle auf strahlende Wärme und ihre Umwandlung dadurch in Schall“. Die Methoden und Resultate dieser Untersuchung werden hier vorgelegt.

Ebenso theilte ich voriges Jahr der Royal Society eine kurze Abhandlung über die „schalllosen Zonen“ mit, die, wie General Duane beobachtet hatte, die Nebelsignal-Stationen an der Küste von Maine umgaben. Die Erklärung, die in dem Berichte über diese merkwürdige Erscheinung gegeben wird, ist im vorliegenden Werke wiedergegeben und erläutert. Ich denke, sie wird eine Kritik aushalten.

Kurze Beschreibungen der Telephone von Bell und Edison, des Mikrophons und des Phonographen sind eingefügt.

Versuche, die die Brechung des Schalls an den Grenzflächen verschiedener Gase betreffen, sind beschrieben. Die Wirkung einer Aenderung in der Fortflanzungsgeschwindigkeit wird auf diese Art deutlich erklärt, und der Zuhörer kommt zu einer klaren Anschauung der Folgen einer gleichen Aenderung für das Licht.

Die Beobachtungen über Nebelsignale, die in der siebenten Vorlesung mitgetheilt worden sind, sind erweitert und durch die Beigabe von Karten verständlicher gemacht worden.

Das Aufhalten des Schalls durch durchsichtige, aber nicht homogene Atmosphären und sein verhältnissmässig leichter Durchgang durch dichten Rauch, durch Schauer von Kleie, Papierschnitzeln und Wasser, durch wollene und andere Gewebe, und durch Filz — genug durch alle Substanzen, die genügend porös sind, dass die Continuität der Luft in ihnen erhalten bleibt — wird genauer erklärt.

VORWORT DER HERAUSGEBER.

Die Vorlesungen, welche unser verstorbener Freund Tyndall als Nachfolger der grossen Naturforscher Davy und Faraday in den Wintermonaten vor den gebildetsten Kreisen Londons in der Royal Institution über die verschiedenen Theile der Physik zu halten pflegte, haben in England allseitige Anerkennung gefunden.

Tyndall besass in ungewöhnlichem Grade die Gabe, durch die glückliche Vereinigung einer ebenso klaren wie eleganten Darstellung mit vortrefflich ersonnenen und schlagenden Versuchen selbst die schwierigeren Lehren der Physik dem gebildeten Publicum zugänglich zu machen. Eine Herausgabe seiner Vorlesungen in deutscher Bearbeitung schien deshalb auch bei uns nicht wenig zur Verbreitung physikalischer Kenntnisse in weiteren Kreisen beitragen zu können. Die Unterzeichneten haben daher, wie schon früher die Vorlesungen über die Wärme, so auch jetzt die vorliegenden Vorträge über den Schall unter

ihrer besonderen Aufsicht übersetzen lassen und die Druckbogen einer genauen Durchsicht unterzogen, damit auch die deutsche Bearbeitung den englischen Werken von Tyndall nach Form und Inhalt möglichst entspräche. In der zweiten Auflage der deutschen Uebersetzung sind die Zusätze, welche der Verfasser der inzwischen erschienenen, zweiten Auflage des Originalwerkes beigefügt hat, namentlich auch eine Uebersicht der neueren Untersuchungen des Herrn Regnault, mit aufgenommen worden.

H. v. Helmholtz.
G. Wiedemann.

VORWORT
ZUR
DRITTEN DEUTSCHEN AUSGABE.

Nach unserem trefflichen Freunde Tyndall ist nun auch Helmholtz dahingeschieden, tief betrauert von den ihm Nahestehenden und den Gelehrten der ganzen Welt. Die hohe Anerkennung, welche er den Werken von Tyndall durch seine Betheiligung an der deutschen Ausgabe zollte, ist ihnen auch in weiteren Kreisen treu geblieben.

Als in Folge dessen eine erneute Auflage des Schalls in deutscher Sprache erforderlich schien, haben in pietätvollem Andenken an die Verstorbenen Frau Anna von Helmholtz und Frau Clara Wiedemann sich der Mühe unterzogen, dieselbe nach der letzten sechsten Ausgabe des englischen Originals durchzuarbeiten.

Entsprechend den früher von Tyndall selbst geäusserten Wünschen haben sie die Abänderungen und Ergänzungen des englischen Originals

getreu wiedergegeben und namentlich auch die eingehende Darstellung seiner für die Schifffahrt so hoch wichtigen Untersuchungen über die Nebelsignale hinzugefügt.

Möge Tyndall's Werk auch in seiner neuen Gestalt ebenso anregend und fördernd für die Verbreitung der wissenschaftlichen Interessen wirken, wie es die früheren gethan.

Leipzig, 15. Februar 1897.

G. Wiedemann.

INHALT.

Erste Vorlesung.

Erzeugung und Fortpflanzung der Schallbewegung. — Versuche mit tönenden Körpern im luftleeren Raume. — Wirkung von Wasserstoffgas auf den Schall. — Fortpflanzung des Schalls durch Luft von wechselnder Dichtigkeit. — Zurückwerfung des Schalls. — Das Echo. — Brechung des Schalls. — Beugung des Schalls. — Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit. — Einfluss der Dichtigkeit und Elasticität. — Newton's Berechnung der Schallgeschwindigkeit. — Abänderungen der Newton'schen Formel durch Laplace. — Ableitung des Verhältnisses der specifischen Wärme bei constantem Druck und constantem Volumen aus der Schallgeschwindigkeit. — — Ableitung des mechanischen Wärmeäquivalents aus diesem Verhältniss. — Folgerung, dass die atmosphärische Luft kein merkliches Wärmestrahlungsvermögen besitzt. — Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen. — Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten und festen Körpern. — Einfluss der Anordnung der Moleküle auf die Schallgeschwindigkeit . . . . . Seite 1 — 52
Uebersicht der ersten Vorlesung . . . . . „ 53 — 56

Zweite Vorlesung.

Physikalischer Unterschied zwischen Geräusch und Musik. — Ein musikalischer Ton wird durch regelmässig wiederkehrende, ein Geräusch durch unregelmässige Schwingungen erzeugt. — Erzeugung musikalischer Töne durch Schläge. — Erzeugung derselben durch Luftstösse. — Erklärung der Höhe und Tiefe des Tons. — Schwingungen einer Stimmgabel. — Graphische Darstellung derselben auf berussten Glasplatten. — Optische Darstellung der Schwingungen einer Stimmgabel. — Beschreibung der Sirene. — Grenzen des Gehörs; höchste und tiefste Töne. — Bestimmung der Geschwindigkeit der Schwingungen durch die Sirene. — Bestimmung der Länge der Schallwellen. —

Wellenlängen der menschlichen Stimme bei Männern und Frauen. — Fortpflanzung der Töne durch Flüssigkeiten und feste Körper. Seite 57 — 96

Uebersicht der zweiten Vorlesung . . . . . „ 97 — 99

Dritte Vorlesung.

Schwingungen von Saiten. — Einfluss der Resonanzböden. — Gesetze der schwingenden Saiten. — Ruhende und fortschreitende Wellenknoten und Bäuche. — Anwendung der Resultate auf die Schwingungen der tönenden Saiten. — Versuche von Melde. — Saiten, die durch Stimmgabeln in Schwingungen versetzt werden. — Die Gesetze der Schwingungen auf diese Weise erklärt. — Harmonische Töne der Saiten. — Erklärung von Timbre, von Obertönen und Klangfarbe. — Aufhebung bestimmter harmonischer Obertöne. — Bedingungen für die Intensität der harmonischen Obertöne. — Optische Untersuchung der Schwingungen einer Klaviersaite . . . Seite 100 — 145

Uebersicht der dritten Vorlesung . . . . . „ 146 — 149

Vierte Vorlesung.

Transversale Schwingungen eines an beiden Enden befestigten Stabes, seine Unterabtheilungen und die entsprechenden Obertöne. — Schwingungen eines an einem Ende befestigten Stabes. — Das Kaleidophon. — Die Eisenvioline und die Spieldose. — Schwingungen eines an beiden Enden freien Stabes. — Das Holzinstrument und die Glasharmonika. — Schwingungen einer Stimmgabel, ihre Unterabtheilungen, und ihre Obertöne. — Schwingungen von quadratischen Platten. — Chladni's Entdeckungen. — Wheatstone's Analyse der Schwingungen der Platten. — Chladni's Figuren. — Schwingungen von Scheiben und Glocken. — Versuche von Faraday und Strehlke. Seite 150 — 183

Uebersicht der vierten Vorlesung . . . . . „ 184 — 186

Fünfte Vorlesung.

Längsschwingungen eines Drahtes. — Schallgeschwindigkeit in Messing und Eisen. — Längsschwingungen eines Stabes, der an einem Ende befestigt ist, und eines Stabes, dessen beide Enden frei sind. — Knotenpunkte und Obertöne der longitudinal schwingenden Stäbe. — Beobachtung schwingender Stäbe bei polarisirtem Lichte. — Schallgeschwindigkeit in festen Körpern. — Resonanz. — Schwingungen in gedackten Pfeifen; deren Abtheilungen und Obertöne. — Wie sich die Töne gedackter Pfeifen zu denen offener Pfeifen verhalten. — Zustand der Luftsäule in einer tönenden Orgelpfeife. — Zungen und

Zungenpfeifen. — Das Stimmorgan. — Obertöne der Stimmbänder. — Die Klänge der Vocale. — Telephon, Mikrophon und Phonograph. — Kundt's Versuche. — Neue Methoden, um die Geschwindigkeit des Schalls zu bestimmen . . . . . Seite 187 — 269
Uebersicht der fünften Vorlesung . . . . . „ 270 — 276

Sechste Vorlesung.

Singende Flammen. — Einfluss der Röhre, welche die Flamme umgiebt. — Einfluss der Grösse der Flamme. — Harmonische Töne der Flammen. — Wirkung des Einklanges auf singende Flammen. — Einwirkung des Schalls auf freie Flammen. — Versuche mit Fischschwanz- und Fledermausbrennern. — Versuche mit schmalen Flammen. — Ausserordentliche Empfindlichkeit der Flammen als akustische Reagentien. — Die Vocalflamme. — Wirkung des Sprechens auf Flammen. — Wirkung von musikalischen Tönen auf unentzündete Gasstrahlen. — Bildung und Form von Wasserstrahlen. — Theorie von Plateau über das Zerfallen flüssiger Strahlen in Tropfen. — Einfluss musikalischer Töne auf Wasserstrahlen. — Ein Wasserstrahl kann sich in Bezug auf Empfindlichkeit mit dem Ohre messen. Seite 277 — 327
Uebersicht der sechsten Vorlesung . . . . . „ 328 — 331

Siebente Vorlesung.

Erster Theil.

Untersuchungen über die akustische Durchlässigkeit der Atmosphäre in Beziehung zur Frage der Nebelsignale.

Einleitung. — Instrumente und Beobachtungen. — Einfluss des Schallschattens. — Widersprechende Resultate. — Lösung der Widersprüche. — Luftreflexion und ihre Ursachen. — Luftechos. — Akustische Wolken. — Experimentelle Darstellung des Aufhaltens des Schalls durch Luftreflexion . . . . . Seite 332 — 381

Zweiter Theil.

Prüfung der Ursachen, die man bis dahin für wirksam hielt, den Durchgang des Schalls durch die Atmosphäre zu verhindern.

Wirkung des Hagels und des Regens. — Wirkung des Schnees. — Wirkung des Nebels: Beobachtungen in London. — Versuche mit künstlichen Nebeln. — Beobachtungen über Nebel am South Foreland. — Wirkung des Windes. — Atmosphärische Auswahl. — Einfluss des Schallschattens . . . . . Seite 381 — 419
Uebersicht der siebenten Vorlesung . . . . . „ 420 — 422

Achte Vorlesung.

Gesetz der schwingenden Bewegungen in Wasser und Luft. — Superposition der Schwingungen. — Interferenz und Coincidenz der Tonwellen. — Aufhebung von Ton durch Ton. — Combinirte Wirkung zweier fast im Einklange befindlicher Töne. — Theorie der Schwebungen. — Optische Darstellung des Princips der Interferenz. — Zunahme der Intensität durch Auslöschung eines Theils der Schwingungen. — Schallfreie Zonen von Duane. — Combinationstöne. — Bedingungen ihrer Erzeugung. — Erläuterung durch Versuche. — Differenztöne und Summationstöne. — Die Theorien von Young und Helmholtz . . . . . Seite 423 — 461
Uebersicht der achten Vorlesung . . . . . „ 462 — 464

Neunte Vorlesung.

Verbindung musikalischer Töne. — Je kleiner die Zahlen sind, welche das Schwingungsverhältniss zwischen zwei Tönen ausdrücken, desto vollkommener ist die Harmonie. — Begriffe der Pythagoräer über musikalische Consonanz. — Theorie der Consonanz von Euler. — Theorie von Helmholtz. — Die Dissonanz rührt von den Schwebungen oder Schlägen her. — Interferenz der Grundtöne und der Obertöne. — Mechanismus des Gehörs. — Max Schultze's Hörhärchen. — Die Hörsteinchen. — Corti'sche Fasern. — Graphische Darstellung der Consonanz und Dissonanz. — Musikalische Saiten. — Töne der diatonischen Scala. — Die Schwingungen der musikalischen Intervalle werden sichtbar gemacht. — Lissajous' Figuren. — Das Mitschwingen. — Verschiedene Methoden, die zusammengesetzten Schwingungen zu erläutern . . . . . Seite 465 — 510
Uebersicht der neunten Vorlesung . . . . . „ 511 — 514

Anhang I.

Ueber die Einwirkung musikalischer Töne auf die Flamme eines Leuchtgasstrahls von John Leconte M. D. . . . . Seite 515

Anhang II.

Ueber die Reversibilität des Schalls . . . . . Seite 522
Merkwürdige Beispiele von akustischer Undurchlässigkeit der Luft „ 532

Alphabetisches Inhaltsverzeichniss 536

Beigabe:

Bildniss von Chladni (gegenüber Seite 164).

Der Schall.

Erste Vorlesung.

Erzeugung und Fortpflanzung der Schallbewegung. — Versuche mit tönenden Körpern im luftleeren Raume. — Wirkung von Wasserstoffgas auf den Schall. — Fortpflanzung des Schalls durch Luft von wechselnder Dichtigkeit. — Zurückwerfung des Schalls. — Das Echo. — Brechung des Schalls. — Beugung des Schalls. — Einfluss der Temperatur auf die Geschwindigkeit. — Einfluss der Dichtigkeit und Elasticität. — Newton's Berechnung der Schallgeschwindigkeit. — Abänderung der Newton'schen Formel durch La Place. — Ableitung des Verhältnisses der specifischen Wärme bei constantem Druck und bei constantem Volumen aus der Schallgeschwindigkeit. — Ableitung des mechanischen Wärmeäquivalents aus diesem Verhältniss. — Folgerung, dass die atmosphärische Luft kein merkliches Wärmestrahlungsvermögen besitzt. — Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen. — Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten und festen Körpern. — Einfluss der Anordnung der Moleküle auf die Schallgeschwindigkeit.

§. 1. Charakter der Schallbewegung. — Experimenteller Nachweis.

Die verschiedenen Nerven des menschlichen Körpers haben ihren Ursprung im Gehirn, und das Gehirn ist der Sitz der Wahrnehmung. Verwunden Sie ihren Finger, so befördern die Nerven, welche von dem Finger zum Gehirn laufen, die Nachricht von der Verletzung dorthin; wenn aber diese Nerven durchschnitten sind, so

fühlen Sie keinen Schmerz, wie schwer die Verwundung auch sein mag. Wir haben allen Grund anzunehmen, dass das, was die Nerven zum Gehirn überführen, in allen Fällen Bewegung sei. Die hier gemeinte Bewegung ist nicht die des Nerven als Ganzes, sondern seiner Moleküle oder kleinsten Theilchen [1]).

Die Bewegungen der Moleküle der Nerven erzeugen Empfindungen verschiedener Art, je nach den verschiedenen Theilen des Gehirns, denen sie mitgetheilt werden. So entspricht den Bewegungen, die Zunge und Gaumen aussenden, der Geschmackssinn; die Bewegung, die von der Retina den Sehnerven entlang entsendet wird, erweckt das Bewusstsein des Lichtes; während die Bewegungen, die uns jetzt besonders beschäftigen sollen und die durch den Gehörnerven übertragen werden, im Gehirn zum Schall werden.

Bringe ich eine Flamme an einen kleinen Collodiumballon, der eine Mischung von Sauerstoff und Wasserstoff enthält, so explodirt das Gas, und jedes Ohr in diesem Zimmer verspürt eine Erschütterung, welche mit dem Namen Schall bezeichnet wird. Wie wurde diese Erschütterung von dem Ballon zu unserem Gehörorgan fortgepflanzt? Haben die explodirenden Gase die Lufttheilchen gegen die Gehörnerven geschossen, wie eine Kanone eine Kugel gegen die Scheibe schiesst? Es unterliegt keinem Zweifel, dass in der Nähe des Ballons bis zu einer gewissen Entfernung die Theilchen fortgestossen werden; aber kein Lufttheilchen aus der Nähe des

[1]) Die Geschwindigkeit, mit der ein Eindruck durch die Nerven des Frosches fortgepflanzt wird, beträgt nach der Bestimmung von Helmholtz, welche von Du Bois-Reymond bestätigt wurde, 27,9 m in der Secunde. Neuere Messungen machen es wahrscheinlich, dass im Menschen und in den höheren Thieren die Fortpflanzungsgeschwindigkeit viel grösser ist.

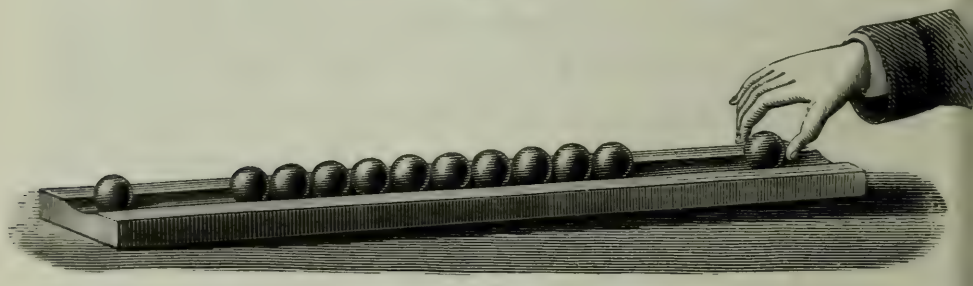
Ballons erreichte das Ohr irgend einer der hier anwesenden Personen. Der Vorgang war folgender: Als die Flamme die gemischten Gase berührte, verbanden sich diese chemisch und ihre Verbindung war von der Entwickelung einer grossen Hitze begleitet. Die Luft dehnte sich an dieser heissen Stelle plötzlich aus und drängte die sie umgebende Luft gewaltsam nach allen Seiten hin fort. Die Bewegung der in der Nähe des Ballons befindlichen Luft wurde schnell der etwas entfernteren mitgetheilt, während die zuerst in Bewegung gesetzte Luft zur selben Zeit in Ruhe kam. Die etwas entferntere Luft theilte ihre Bewegung der noch weiter entfernten mit und kam ihrerseits auch in Ruhe. So nahm, wenn ich den Ausdruck brauchen darf, jede Luftschale, die den Ballon umgab, die Bewegung der nächstvorhergehenden auf und theilte sie der nächstfolgenden Schale mit; dadurch wurde die Bewegung als Erschütterung oder Welle durch die Luft fortgepflanzt.

Die Fortbewegung der Erschütterung darf aber nicht mit der Bewegung der Theilchen selbst verwechselt werden, die in jedem Moment die Erschütterung bilden. Denn während sich die Welle durch bedeutende Entfernungen vorwärts bewegt, macht jedes einzelne Lufttheilchen nur eine kleine Bewegung hin und her.

Der Vorgang kann etwa durch die Fortpflanzung der Bewegung durch eine Reihe von Glaskugeln, wie man sie bei dem Solitairespiel benutzt, dargestellt werden. Ich lege die Kugeln hinter einander in eine Rinne (Fig. 1 a. f. S.), so dass jede ihre beiden Nachbarn berührt. Eine Kugel schleudere ich gegen das Ende der Reihe. Die so der ersten Kugel gegebene Bewegung wird der zweiten mitgetheilt, die Bewegung der zweiten pflanzt sich auf die dritte fort, die der

dritten auf die vierte; jede Kugel kommt, nachdem sie ihre Bewegung abgegeben hat, wieder in Ruhe. Nur die letzte Kugel der Reihe fliegt fort. So wird der Schall von Theilchen zu Theilchen durch die Luft fortgepflanzt. Die Theilchen, die die äussere Höhlung des Ohres erfüllen, werden zuletzt gegen das Trommelfell gestossen, welches quer über die Höhlung gespannt ist, die zum Gehirn führt. Die Schwingungen dieser Membran, die ausserhalb das „innere Ohr“ schliesst, werden durch eine Reihe von Knochen einer anderen Membran mitgetheilt, auf welche sie sich innen ansetzen, von dort

Fig. 1.



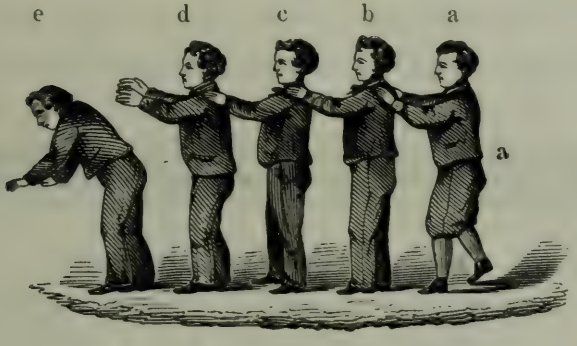
durch Wasser zu den Enden der Gehörnerven und von diesen den Nerven entlang zum Gehirn fortgepflanzt.

Hier wird das Physische psychisch, mechanische Schwingungen erwecken das Bewusstsein des Schalls.

Der Besitz klarer fundamentaler Vorstellungen ist so wichtig, dass ich die Fortpflanzung des Schalls noch durch ein einfaches, aber zweckmässiges Beispiel klar machen will. Hier stehen fünf junge Assistenten, *a*, *b*, *c*, *d* und *e* (Fig. 2), in einer Reihe, einer hinter dem anderen; die Hände jedes Knaben ruhen auf den Schultern des vor ihm stehenden. *e* ist der vorderste und *a* beschliesst die Reihe. Ich stosse *a* plötzlich an; *a* stösst *b* und nimmt seine aufrechte Stellung wieder ein; *b* stösst *c*; *c* stösst *d*; *d* stösst *e*; jeder Knabe steht, nach-

dem er den Stoss mitgetheilt hat, selbst wieder aufrecht. Nur *e*, der Niemand vor sich hat, wird vornüber geworfen. Hätte er am Rande eines Abgrundes gestanden, so würde er hinuntergestürzt sein; wäre er in Berührung mit dem Fenster gekommen, so hätte er das Glas zerbrochen; hätte er dicht vor einer Trommel gestanden, so hätte er die Trommel erschüttert. So könnten wir den Stoss durch eine Reihe von hundert Knaben fortpflanzen, in der jeder einzelne Knabe indess nur hin und her schwingen würde. So schicken wir auch den Schall durch die Luft und erschüttern das Trommelfell

Fig. 2.



eines entfernten Ohres, während jedes einzelne Lufttheilchen, das an der Fortpflanzung des Anstosses betheiligt ist, nur eine kleine Schwingung macht.

Wir haben noch nicht Alles von unserer Reihe von Knaben gelernt, was sie uns lehren kann. Wenn ich *a* anstosse, so kann er langsam nachgeben und so seinem Nachbar *b* die Bewegung zögernd mittheilen. *b* kann dasselbe bei *c*, *c* bei *d* und *d* bei *e* thun. Auf diese Art kann die Bewegung verhältnissmässig langsam auf der ganzen Linie mitgetheilt werden. Aber *a* kann auch, wenn ich ihn stosse, durch eine kräftige Muskelanstrengung und durch ein schnelles Zurücktreten rasch die Bewegung an *b* mittheilen und selbst zur Ruhe kommen;

b kann dasselbe bei *c*, *c* bei *d*, *d* bei *e* thun, und so wird dann die Bewegung rasch durch die Linie fortgepflanzt. Jetzt ist nun diese kräftige Muskelanstrengung und dieses schnelle Zurücktreten der Elasticität der Luft beim Schall analog. Bei der Schallwelle giebt eine Luftschicht, wenn sie gegen die nächste Schicht getrieben wird, ihre Bewegung ab und weicht zurück, und je schneller diese Abgabe und dieses Zurückweichen geschieht, oder mit anderen Worten, je grösser die Elasticität der Luft ist, desto grösser ist die Geschwindigkeit des Schalls.

Eine sehr lehrreiche Form, die Uebertragung einer Schallwelle darzustellen, wird durch den Apparat in Fig. 3 gezeigt, den mein Assistent, Herr Cottrell, zu-

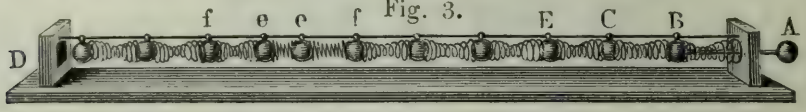


Fig. 3.

sammengestellt hat. Er besteht aus einer Reihe von Holzkugeln, die durch Spiralfedern von einander getrennt sind. Wenn man auf den Knopf bei *A* schlägt, so trifft ein an ihm befestigter Stab die erste Kugel *B*, die ihre Bewegung *C* mittheilt, diese geht auf *E* über und so fort durch die ganze Reihe. Das Eintreffen bei *D* wird durch den Stoss der letzten Kugel gegen das Holz angezeigt oder durch das Läuten einer Glocke. Die Elasticität der Luft wird hier durch die Federn dargestellt. Die Bewegung kann so langsam gemacht werden, dass man sie mit den Augen verfolgen kann.

Die naturwissenschaftliche Bildung soll uns lehren, sowohl das Sichtbare als das Unsichtbare in der Natur zu erkennen; mit dem geistigen Auge uns jene Vorgänge vorzustellen, die sich dem körperlichen Auge vollständig entziehen.

In dem vorliegenden Falle müssen wir uns bemühen, uns eine klare Vorstellung von einer Schallwelle zu machen. Wir müssen mit dem geistigen Auge die Lufttheilchen sehen, wie sie durch die Explosion unseres Ballons nach aussen getrieben werden und sich dicht an einander drängen; aber gleich hinter dieser Verdichtung sind die Theilchen noch weiter von einander entfernt. Kurz, wir müssen eine deutliche Vorstellung davon haben, dass eine Schallwelle aus zwei Theilen besteht, in deren einem die Luft dichter, in deren anderem sie weniger dicht ist als gewöhnlich. So sind also eine Verdichtung und eine Verdünnung die zwei Bestandtheile einer Schallwelle.

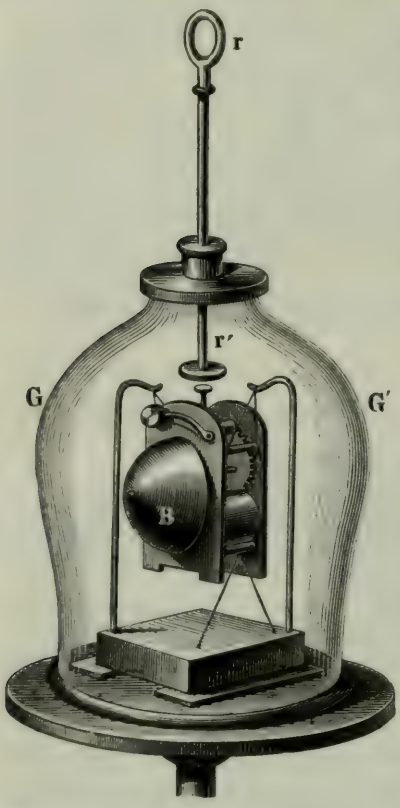
§. 2. Versuche im luftleeren Raume, im Wasserstoff und auf den Bergen.

Dass die Luft für die Fortpflanzung des Schalls nothwendig ist, bewies zuerst der berühmte Robert Boyle durch Versuche. Sein Versuch, nachdem er eine Zeit lang vergessen zu sein schien, wurde von Hawksbee 1705 wieder aufgenommen. Eine Glocke wurde so unter dem Recipienten einer Luftpumpe befestigt, dass man sie läuten konnte, nachdem die Luft ausgepumpt war. Ehe die Luft entfernt war, konnte der Ton der Glocke in dem Recipienten gehört werden; als die Luft ausgepumpt war, wurde der Schall so schwach, dass er kaum hörbar war. Ich habe hier eine Einrichtung, mit der ich Hawksbee's Versuch leicht wiederholen kann. In diesem Gefässe GG' (Fig. 4, a. f. S.), welches auf dem Teller einer Luftpumpe steht, befindet sich eine Glocke B, die mit einem Uhrwerk verbunden ist [1]). Nachdem das Gefäss

[1]) Ein sehr wirksames Instrument, das in der Royal Institution von Mr. Warren de la Rue vorgeführt wurde.

möglichst vollständig entleert worden ist, löse ich mittelst des Stabes *rr'*, der luftdicht oben durch das Gefäss geht, den Hammer aus. Er schlägt, Sie sehen ihn anschlagen, aber Sie hören nur in unmittelbarer Nähe der Glocke den Schall. Ich lasse jetzt Wasserstoffgas, das, wie Sie wissen, vierzehnmal leichter als Luft ist, in das Gefäss eintreten. Der Schall der Glocke wird nicht merklich durch die Anwesenheit dieses sehr dünnen Gases verstärkt, obgleich der Recipient ganz damit angefüllt ist. Die die Glocke umgebende Luft wird noch dünner, wenn mit der Pumpe gearbeitet wird. So erhalten wir einen Raum, in dem das Gas noch weniger dicht ist, als bei den Versuchen von Boyle und von Hawksbee, und dies ist sehr wichtig, denn die letzten Spuren der Luft sind bei diesem Versuch hauptsächlich wirksam. Sie sehen jetzt, wie der Hammer gegen die Glocke schlägt, aber Sie hören keinen Ton. Selbst wenn ich mein Ohr an den ausgepumpten Recipienten lege, kann ich nicht den schwächsten Klang vernehmen. Die Glocke ist an Schnüren aufgehängt, denn wenn sie auf dem Teller der Luftpumpe ruhte, so würden sich die Schwingungen dem Teller mittheilen und auf die Luft ausserhalb übertragen werden.

Fig. 4.



Ich lasse jetzt Luft möglichst geräuschlos in das Gefäss eintreten. Sie hören sogleich einen schwachen

Ton, der lauter wird, so wie die Luft dichter wird und jetzt hört Jedermann in dieser grossen Versammlung deutlich das Tönen der Glocke [1]).

Sir John Leslie fand Wasserstoff merkwürdig wenig befähigt, als Beförderungsmittel des Tones einer Glocke zu dienen, die im Gase angeschlagen wurde. Noch mehr, um Töne in die Ferne zu tragen, entfernte er aus einem, diesem hier vor Ihnen ähnlichen Recipienten die Hälfte der Luft und hörte den Klang der Glocke deutlich. Als er in den halb gefüllten Recipienten Wasserstoff einliess, bis dieser ganz gefüllt war, schwand der Ton allmählich, bis er kaum mehr hörbar war. Dieses Resultat blieb ein Räthsel, bis es eine einfache und zufriedenstellende Lösung durch Professor Stokes fand. Wenn ein gewöhnliches Pendel schwingt, so hat es die Neigung, eine Verdichtung nach vorn und eine Verdünnung nach hinten zu bilden. Aber es ist nur eine Neigung; die Bewegung ist so langsam, dass die sehr elastische Luft von vorn fortgeht, ehe sie merklich verdichtet worden ist und den Raum hinten ausfüllt, ehe sie besonders verdünnt sein kann. Daher werden auch keine Klangwellen oder Stösse durch das Pendel erzeugt. Um die Verdichtung und Verdünnung zu erzeugen, die eine Schallwelle in der Luft bildet, braucht es einen gewissen starken Stoss.

Je elastischer und beweglicher das Gas ist, desto leichter kann es sich von vorn fortbewegen und den hinteren Raum anfüllen und so der Bildung von Ver-

---

[1]) Ich leitete den Strahl einer elektrischen Lampe auf Glaskugeln, die mit einer Mischung gleicher Theile von Chlor und Wasserstoff angefüllt waren, und brachte die Kugeln im Vacuum und in der Luft zur Explosion. Der Unterschied war vollkommen merkbar, wenngleich nicht so überraschend, wie ich zuerst erwartete.

dichtungen und Verdünnungen durch einen schwingenden Körper Widerstand leisten. Wasserstoff ist weit beweglicher als Luft, und daher ist die Entwickelung von Schallwellen in ihm mit weit mehr Schwierigkeit verbunden, als in der Luft. Eine Anzahl Schwingungen, die vollständig genügt, um Schallwellen in dem einen zu erzeugen, kann vollständig unfähig sein, sie im anderen zu erzeugen. Sowohl Berechnung als auch Beobachtung beweisen die Richtigkeit dieser Erklärung, auf die wir später zurückkommen werden.

In grossen Höhen nimmt der Schall in der Luft merklich an Stärke ab. De Saussure beobachtete, dass die Explosion einer Pistole auf der Spitze des Mont Blanc ungefähr der eines gewöhnlichen Schwärmers unten gleich kam. Ich habe diesen Versuch öfter wiederholt, zuerst, da ich nichts Besseres hatte, mit einer kleinen Zinnkanone, deren zerstörte Reste vor Ihnen liegen, und dann mit Pistolen. Was mich am meisten überraschte, war der Mangel jener Fülle und Schärfe im Schall, der ihn an niedriger gelegenen Orten charakterisirt. Der Pistolenschuss glich der Explosion einer Champagnerflasche, aber er war doch laut. Die Verdünnung der Luft bis auf den Druck einer halben Atmosphäre übt keinen besonderen Einfluss auf unsere tönende Glocke aus, und Luft von der Dichtigkeit, wie sie auf der Spitze des Mont Blanc gefunden wird, kann die Gehörnerven noch sehr kräftig erregen. Dass sehr verdünnte Luft einen sehr starken Ton fortpflanzen kann, ist durch die Explosion von Meteoren in grossen Höhen über der Erde erwiesen worden. Indess muss hier die anfängliche Störung sehr heftig gewesen sein.

Die Bewegung des Schalls wird, wie jede andere Bewegung, bei ihrem Uebergang von einem leichten

auf einen schweren Körper geschwächt. Ich nehme den Recipienten fort, der bis jetzt unsere Glocke bedeckte; Sie hören, wie sie jetzt in der freien Luft viel lauter klingt. Als die Glocke bedeckt war, wurden die Luftschwingungen zuerst dem schweren Glasgefäss mitgetheilt und nachher durch das Gefäss der äusseren Luft; eine grosse Abnahme der Stärke des Klanges war die Folge. Die Wirkung des Wasserstoffgases auf die Stimme ist ein Beispiel derselben Art. Die Stimme wird erzeugt, indem man Luft aus den Lungen durch ein besonderes Organ, die Stimmritze genannt, presst. Bei ihrem Durchgange wird sie durch die Stimmbänder in Schwingungen versetzt, die so den Ton erzeugen. Wenn ich aber meine Lungen mit Wasserstoff fülle und zu sprechen versuche, so theilen die Stimmbänder ihre Bewegung dem Wasserstoff mit, der sie an die äussere Luft überträgt. Bei dieser Fortpflanzung von einem leichten zu einem schweren Gase wird die Stimme so geschwächt, dass sie nur noch ein Hauch ist [1]).

Die Stärke des Schalles hängt von der Dichtigkeit der Luft ab, in der der Schall erzeugt wird, und nicht von der Luft, in der er gehört wird [2]). Nehmen wir an, die Spitze des Mont Blanc sei gleich weit von der Spitze der Aiguille Verte und von der Brücke bei Chamonix entfernt, und es seien zwei Beobachter aufgestellt, der eine auf der Brücke und der andere auf der Aiguille, so würde der Schall einer auf dem Mont Blanc abgefeuerten Kanone von beiden Beobachtern

---

[1]) Bei diesem Versuche wird gut gereinigter Wasserstoff in einen Gummisack gethan; die Lungen werden geleert und das Gas inhalirt. Die Wirkung ist so eigenthümlich, dass der Redner kaum den Gedanken los wird, dass er den Hörer betrügt.

[2]) Poisson, Mécanique, vol. II, pag. 707.

gleich stark gehört werden, obgleich in dem einen Falle der Schall seinen Weg durch die dünne Luft oben nehmen würde, in dem anderen in die dichtere Luft nach unten niedersteigen müsste. Messen Sie ferner eine gerade Linie gleich der von der Brücke von Chamonix zu der Spitze des Mont Blanc auf der Erdoberfläche das Thal von Chamonix entlang, und stellen Sie zwei Beobachter, den einen auf den Gipfel, den anderen an das Ende der Linie, so wird der Schall einer auf der Brücke abgefeuerten Kanone beide Beobachter mit derselben Stärke treffen, obgleich im einen Falle der Schall durch die dichte Luft des Thales fortgepflanzt wird und er im anderen Falle durch die dünnere Luft des Berges aufsteigen muss. Laden Sie aber zwei Kanonen gleich stark und feuern Sie die eine in Chamonix, die andere auf der Spitze des Mont Blanc ab, so wird die in der schweren Luft unten abgefeuerte Kanone oben gehört werden, während die andere, die in der leichten Luft oben abgefeuert wurde, unten nicht gehört wird.

§. 3. Intensität des Schalls. — Gesetz des umgekehrten Quadrats.

Bei unserem explodirenden Ballon verbreitet sich die Schallwelle nach allen Seiten und so wird die durch die Explosion hervorgerufene Bewegung einer fortwährend wachsenden Luftmenge mitgetheilt. Es ist vollkommen klar, dass dies nicht ohne eine Schwächung der Bewegung an jeder Stelle geschehen kann. Denken wir uns um den Mittelpunkt der Explosion eine dünne Kugelschale von Luft mit einem Radius von 1 m gelegt, dann fasst eine Luftschale von derselben Dicke, aber mit 2 m Radius,

viermal so viel Masse; ist ihr Radius 3 m, so ist ihre Masse neunmal so gross; ist er 4 m, sechszehnmal u. s. f. So vermehrt sich die Quantität der in Bewegung gesetzten Masse, wie das Quadrat der Entfernung vom Mittelpunkte der Explosion. Die Intensität oder die Stärke des Schalls vermindert sich in demselben Verhältniss. Wir drücken dieses Gesetz mit den Worten aus, dass wir sagen, die Stärke des Schalls ändert sich umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung.

Wir wollen die Frage von einer anderen Seite betrachten. Die mechanische Wirkung einer Kugel, die eine Scheibe trifft, hängt von zwei Bedingungen ab, vom Gewichte der Kugel und von der Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegt. Die Wirkung ist dem Gewichte einfach proportional, aber sie ist dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional. Der Beweis hierfür ist leicht, aber er gehört eher in das Gebiet der Mechanik, als zu unserem jetzigen Gegenstande. Nun gilt das, was von der, die Scheibe treffenden Kanonenkugel gesagt worden ist, auch für ein Lufttheilchen, das das Trommelfell des Ohres trifft. Betrachten Sie ein Lufttheilchen, wenn die Schallwelle darüber hingeht; es wird aus seiner Ruhelage gegen seinen Nachbar getrieben, erst mit beschleunigter Bewegung, und dann mit einer verzögerten. Der Kraft, die es zuerst vorwärts trieb, steht die elastische Kraft der Luft entgegen, die endlich das Theilchen anhält und es zum Zurückgehen nöthigt. An einem bestimmten Punkte seiner Ausschwingung ist die Geschwindigkeit des Theilchens ein Maximum. Die Stärke des Schalls ist dem Quadrate dieser Maximalgeschwindigkeit proportional.

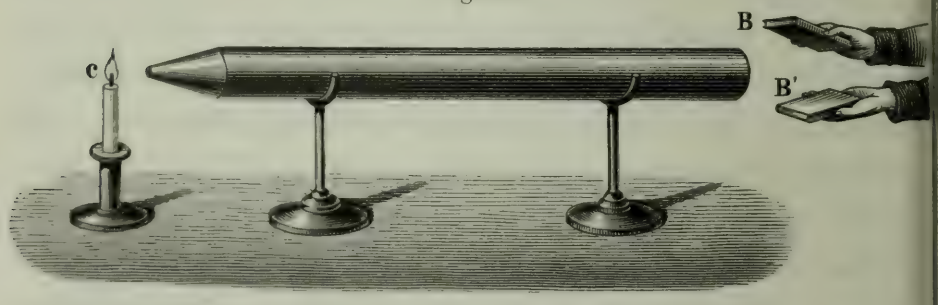
Die Entfernung, durch die die Lufttheilchen sich hin und her bewegen, wenn die Schallwelle über sie

hingeht, wird die Amplitude oder Weite der Schwingung genannt. Die Stärke des Schalls ist auch dem Quadrate der Amplitude proportional.

§. 4. Begrenzung der Schallwellen in Röhren.

Diese Schwächung des Schalls nach dem Gesetze des umgekehrten Quadrates würde nicht eintreten, wenn die Schallwelle so begrenzt würde, dass die seitliche Ausbreitung gehindert wäre. Wir können dies erreichen, wenn wir sie durch eine Röhre mit glatter innerer Oberfläche gehen lassen, und die so begrenzte Welle kann auf grosse Entfernungen mit geringer Abnahme ihrer Stärke fortgepflanzt werden. Ich flüstere ganz leise, so dass es die mir zunächst Sitzenden kaum hören, in das eine Ende dieser 5 m langen Zinnröhre, aber ein Zuhörer an dem anderen Ende hört mich deutlich. Ich halte meine Uhr an das eine Ende der Röhre; die Person an dem anderen Ende hört das Ticken, obgleich es Niemand anders sonst hören kann. Ich stelle jetzt an das entfernte Ende der Röhre eine angezündete Kerze *c* (Fig. 5).

Fig. 5.



Schlage ich meine Hände an diesem Ende zusammen, so wird die Flamme sogleich kleiner. Sie ist nicht ganz ausgelöscht, brennt aber sehr viel schwächer. Schlage ich zwei Bücher BB' zusammen, so lösche ich das Licht

aus[1]). Sie können hier bei diesem rohen Versuche sehen, wie schnell sich die Schallwelle fortpflanzt. In demselben Augenblicke, wo ich schlage, ist das Licht gelöscht. Ich sage nicht, dass die Zeit, die der Schall braucht, um durch diese Röhre zu gehen, unmessbar kurz sei, sondern nur, dass das Intervall zu kurz ist, um von Ihren Sinnen bemerkt zu werden.

Um Ihnen zu beweisen, dass hier eine Schwingung und nicht ein Strom der Luft wirkt, will ich das eine Ende der Röhre mit dem Rauch von angebranntem Papier anfüllen. Schlage ich die Bücher zusammen, so wird keine Spur des Rauches am anderen Ende ausgestossen. Die Erschütterung ist durch beide, durch den Rauch und die Luft, hindurch gegangen, ohne sie mit fortzuführen.

Eine wirksame Methode, um die Fortpflanzung eines Impulses durch die Luft zu werfen, hat mein Assistent erfunden. Die beiden Enden einer Zinnröhre (Fig. 6, a. f. S.) von 5 m Länge werden durch ein darüber gezogenes Kautschukblatt geschlossen. Am einen Ende, *e*, lehnt sich ein Hammer mit einem federnden Griff gegen den Kautschuk; am anderen Ende ist eine Einrichtung zum Anschlagen einer Glocke *c* getroffen. Wird der Hammer *e* bis zu einer Entfernung zurückgezogen, die an dem getheilten Zirkel *f* abgemessen ist und dann losgelassen, so wird der erzeugte Impuls durch das Rohr fortgepflanzt, trifft auf das andere Ende, treibt den Kork *a* an den Hebel *b* an und nöthigt den Hammer *b*, die Glocke anzuschlagen. Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung zeigt sich hier vorzüglich. Wenn man Wasserstoff durch die

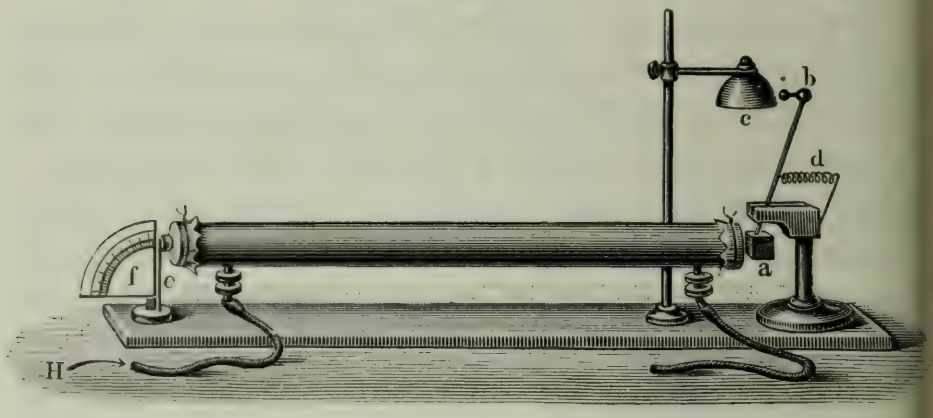
---

[1]) Um die ganze Erschütterung auf die Flamme zu concentriren, endete die Röhre in einem Trichter.

Gummiröhre *H* leitet und so die Luft durch denselben ersetzt, so tönt die Glocke nicht.

Der berühmte französische Naturforscher Biot beobachtete die Fortpflanzung des Schalls durch die leeren Wasserröhren von Paris und fand, dass er mit leiser Stimme eine Unterhaltung durch eine eiserne Röhre von

Fig. 6.



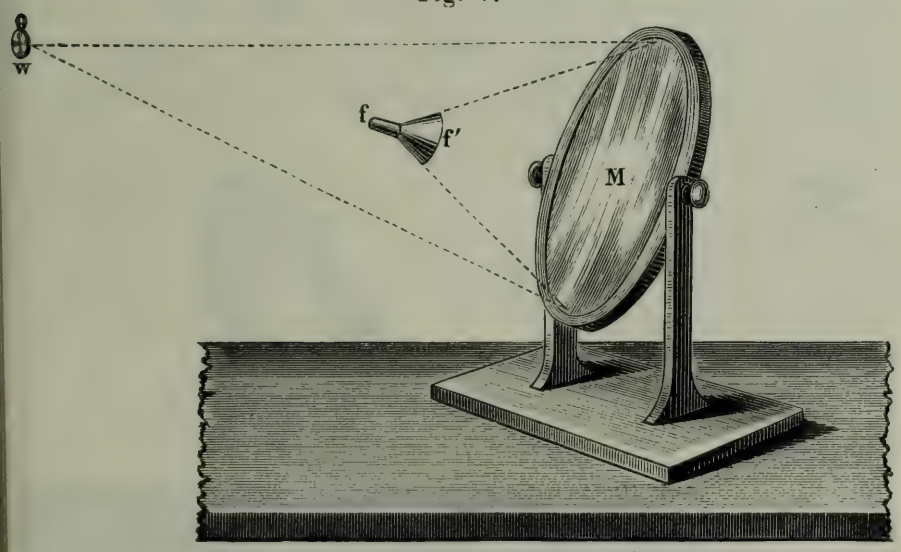
1040 m Länge führen konnte. Und wirklich konnte das leiseste Flüstern in dieser Entfernung gehört werden, während das Abfeuern einer Pistole an dem einen Ende der Röhre ein brennendes Licht an dem anderen auslöschte.

§. 5. Die Reflexion des Schalls. — Aehnlichkeit des Verhaltens des Schalls mit demjenigen des Lichtes.

Die hier besprochene Wirkung des Schalls ist genau dieselbe wie die des Lichts und der strahlenden Wärme. Beide sind, wie der Schall, Wellenbewegungen. Sie vertheilen sich wie der Schall im Raume und nehmen nach demselben Gesetze an Stärke ab. Licht und strahlende Wärme können auch, wie der Schall, mit verhältnissmässig geringem Verluste nach grossen Ent-

fernungen geführt werden, wenn man sie durch eine Röhre mit zurückstrahlender innerer Oberfläche leitet. Es hat in der That jeder Versuch über die Zurückwerfung des Lichtes sein Analogon bei der Zurückwerfung des Schalls. Gestatten Sie mir, Ihnen diese Analogie durch einige Versuche zu beweisen. Auf jener Gallerie sehen Sie dicht neben der Uhr eine elektrische Lampe. Ein Assistent setzt auf der Gallerie die Lampe in Thätigkeit und lässt ihren hell leuchtenden Strahl auf einen Spiegel *M* (Fig. 7) fallen, der hinter dem

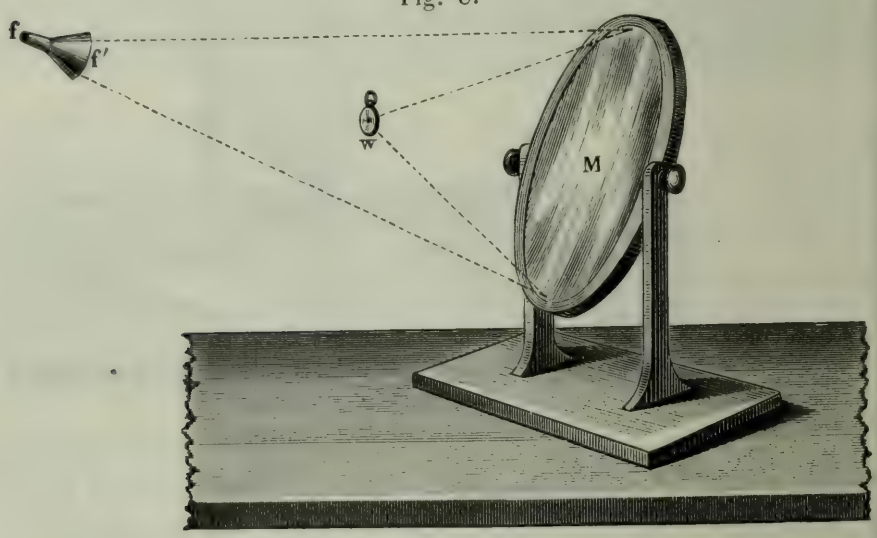
Fig. 7.



Experimentirtische steht. Durch die Reflexion wird das divergirende Strahlenbündel in einen leuchtenden Kegel verwandelt, der sich auf dem Staube des Zimmers abzeichnet. Nachdem der Brennpunkt bezeichnet und die Lampe ausgelöscht worden ist, lege ich mein Ohr an den bezeichneten Punkt. Der Schall wird, wie das Licht, vom Spiegel aufgefangen und man hört das Ticken, als ob es von der reflectirenden Oberfläche und nicht von der Uhr käme. Wir wollen die Wanduhr anhalten und eine Taschenuhr *w* (Fig. 7) an die Stelle bringen, die

noch eben das elektrische Licht einnahm. Ich höre in dieser grossen Entfernung deutlich das Ticken der Uhr. Durch die Einführung des Rohres *f* eines Glastrichters in mein Ohr verstärke ich die Schärfe meines Gehörs bedeutend, da der Trichter hier als Hörrohr wirkt. Wir wissen überdies, dass bei den optischen Erscheinungen die Lage eines Körpers und seines Bildes mit einander vertauscht werden können. Wenn ein Licht in diesen Brennpunkt gestellt wird, so sehen Sie sein Bild oben auf der Gallerie und ich brauche nur den Spiegel auf seinem Ständer zu drehen, damit sein Bild auf einen meiner Zuhörer in der ersten Reihe der Gallerie fällt. Nehme ich das Licht fort und lege die Uhr *w* (Fig. 8)

Fig. 8.

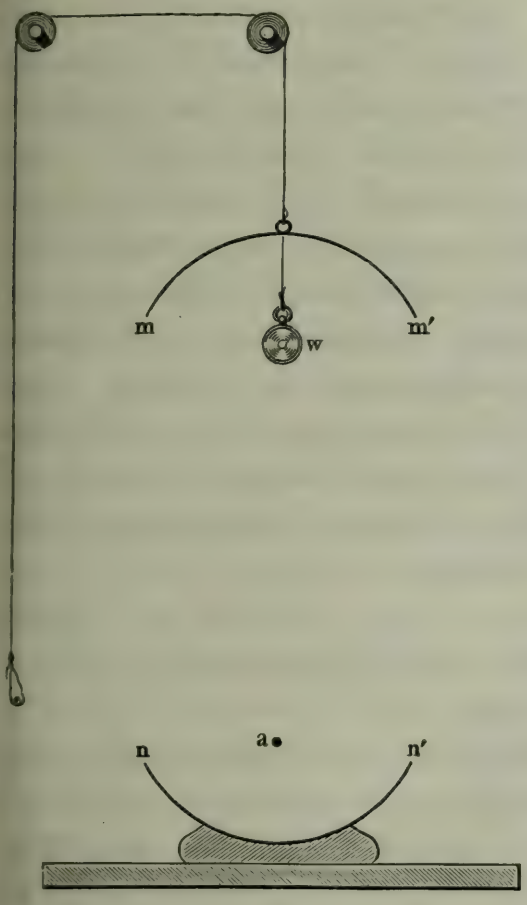


an seine Stelle, so hört die Person, auf die das Bild des Lichtes fiel, deutlich ihr Ticken.

Die „conjugirten Spiegel“, die man benutzt, um die Reflexion von Licht und strahlender Wärme zu zeigen, kann man auch hier anwenden. Der eine dieser beiden parabolischen Spiegel *nn'*, Fig. 9, liegt auf dem Tische, während der andere, *mm'*, auf eine Höhe von 8 m hin-

aufgezogen ist. Wird das elektrische Licht in den Focus *a* des unteren Spiegels gestellt, so steigt ein paralleler Strahl wie eine leuchtende Säule zum oberen Spiegel auf, der die Strahlen in einem Brennpunkte vereint. In demselben sehen Sie einen Punkt von sonnengleichem Glanz, der von der Reflexion des Lichtes an der Oberfläche einer Taschenuhr *w* herrührt. Die Uhr tickt, obgleich ich sie in meiner jetzigen Stellung nicht hören kann. In diesem unteren Focus *a* indessen werden die lebendigen Kräfte aller Schallwellen zusammengeworfen. Halte ich mein Ohr an *a*, oder besser noch einen Trichter mit einer Röhre, die bis zum Ohre reicht, so ist das Ticken so hörbar, als wenn ich die Uhr in der Hand hätte; es scheint, als ob der Schall, wie bei dem früheren Versuche, nicht aus der Uhr selbst, sondern aus dem unteren Spiegel käme [1]).

Fig. 9.



[1]) Man erzählt, dass eine Glocke auf einer Höhe in Helgoland in Folge der grossen Entfernung nicht in der Stadt gehört werden konnte. Ein parabolischer Reflector, der so hinter der Glocke angebracht wurde, dass er die Schallwellen in der Richtung der langen abschüssigen Strasse

Gekrümmte Dächer, Plafonds und geschwellte Segel wirken wie Spiegel auf den Schall. Auf diese Weise sind bedenkliche Geheimnisse verrathen worden, wovon Sir John Herschel ein Beispiel erzählt[1]). In einer Kathedrale in Sicilien war ein Beichtstuhl so aufgestellt, dass das Flüstern der Beichtenden von dem gebogenen Dache reflectirt und nach einem Brennpunkte an einer entfernten Stelle des Gebäudes hin geworfen wurde. Zufällig wurde der Brennpunkt von einem Herrn entdeckt, der eine Zeitlang Freude daran fand, die nur für den Beichtvater bestimmten Aeusserungen mit anzuhören und auch Freunden dies Vergnügen zu gewähren. Eines Tages, so wird erzählt, war seine eigene Frau im Beichtstuhl und sowohl er als seine Freunde erfuhren Geheimnisse, die wenigstens dem einen unter ihnen nichts weniger als erfreulich waren.

Verfliesst eine gewisse Zeit zwischen der Ankunft einer directen und einer reflectirten Schallwelle, so hören wir die letztere als Echo.

Doch kann der Schall wie das Licht mehrere Male hinter einander zurückgeworfen werden, und wie das reflectirte Licht unter diesen Umständen dem Auge immer schwächer erscheint, so wird auch der Schall bei den folgenden Echos immer schwächer für das Ohr. Dieses abwechselnde Auftreten und Verschwinden des Schalls hat in den Bergregionen einen eigenthümlichen Reiz. Besucher von Killarney werden sich des schönen Echos in der Kluft von Dunloe erinnern. Wenn eine Trompete an der richtigen Stelle in der Kluft geblasen wird, so erreichen die Schallwellen nach einander nach

---

zurückwarf, bewirkte, dass man die Schläge der Glocke zu allen Zeiten deutlich hören konnte. Diese Beobachtung bedarf der Prüfung.

[1]) Encyclop. Metrop. art. „Sound“.

in, zwei, drei oder mehreren Reflexionen von den umebenden Klippen das Ohr und sterben in den sanftesten Klängen hin. Auch bei Rosenlaui in der Schweiz bilden die grossen Klippen der Engelhörner einen tiefen Einschnitt, genannt das Ochsenthal, wo die Echos in wunderbarer Weise ertönen. Wird der Schall des Alpenhorns von den Felsen des Wetterhorns oder der Jungfrau zurückgeworfen, so klingt er zuerst rauh. Doch bei den folgenden Reflexionen werden die Töne sanfter und flötenähnlicher; in Folge der allmählichen Abnahme der Stärke scheint sich die Quelle des Schalls tiefer und tiefer in die Eis- und Schneewüsten zurückzuziehen. Man kann die Wiederholung der Echos auch zum Theil der Thatsache zuschreiben, dass sich die reflectirenden Oberflächen in verschiedener Entfernung vom Hörer befinden.

Die Reflexion des Schalls bringt in grossen unmöblirten Sälen oft wunderbare Wirkungen hervor. Stehen Sie z. B. auf der Gallerie der Börse in Paris, so hören Sie das verworrene Geschrei der unten versammelten aufgeregten Menge. Sie sehen alle Bewegungen, sowohl der Lippen als die der Hände und Arme. Sie wissen, dass man spricht, und oft mit grosser Lebhaftigkeit, aber was man sagt, das hören Sie nicht. Die Stimmen mischen sich mit ihren Echos zu einem Chaos von Lärm, aus dem keine verständliche Aeusserung hervor kommen kann. Die Echos eines Zimmers werden durch die Möbel sehr gedämpft. Man kann, wenn Zuhörer anwesend sind, oft eine Rede deutlich verstehen, während in dem leeren Hörsaale die Verständlichkeit der directen Stimme durch die Echos aufgehoben wird. Als ich am 16. Mai 1865 im Senathause der Universität Cambridge Vorlesungen halten sollte, und erst einige

Versuche machte, wie laut ich sprechen müsste, um das Local auszufüllen, war ich sehr erschreckt, als ein Freund an einem entfernten Platze des Saales meinen Worten wegen der Echos nicht folgen konnte. Die versammelten Zuhörer dämpften indess die Schallwellen so, dass die Echos durchaus unmerklich waren, und meine Stimme an allen Punkten des Senathauses deutlich gehört wurde.

Der Schall wird auch von den Wolken zurückgeworfen. Arago berichtet, dass, wenn der Himmel klar sei, der Knall der Kanone auf freiem Felde kurz und scharf sei, während eine Wolke genüge, um ein Echo, wie das Rollen des entfernten Donners, zu erzeugen. Wir werden später ausführlicher die Luftechos besprechen, und dabei zeigen, dass Arago's Schlüsse berichtigt werden müssen.

Sir John Herschel hat in seiner ausgezeichneten Abhandlung „Der Schall" in der Encyclopaedia Metropolitana unter anderen folgende Beispiele von Echos gesammelt: Ein Echo im Park von Woodstock wiederholt 17 Silben bei Tage und 20 bei Nacht; ein Echo an den Ufern des Sees del Lupo oberhalb der Wasserfälle von Terni wiederholt 15 Mal. Das Ticken einer Uhr kann von dem einen Ende der Kirche in der Abtei von St. Albans bis zum anderen gehört werden. Eine achteckige Gallerie in der Kathedrale von Gloucester trägt ein leises Gespräch 25 m weit über das Schiff der Kirche. In der Flüstergallerie der St. Paulskirche wird der leiseste Schall von einer Seite der Kuppel zur anderen getragen, aber an den zwischenliegenden Punkten nicht gehört. Ein Brunnen von 70 m Tiefe und 4 m Breite befindet sich in Carrisbrook Castle auf der Insel Wight. Das Innere ist mit glattem Mauerwerk bekleidet. Fällt eine Nadel in den Brunnen, so hört man sie auf das

Wasser aufschlagen. Hustet oder ruft man in den Brunnen hinein, so tönt es einige Zeit nach [1]).

§. 6. Brechung des Schalls.

Eine andere wichtige Analogie zwischen Schall und Licht ist von Herrn Sondhauss nachgewiesen worden [2]). Eine grosse Linse lenkt die auf sie fallenden Lichtstrahlen von ihrem directen und parallelen Wege ab und vereint sie hinter sich zu einem convergirenden Kegel. Diese Brechung der Lichtstrahlen ist eine Folge der Verzögerung, die das Licht erleidet, wenn es durch das Glas geht. Auf ähnliche Weise kann der Schall gebrochen werden, wenn er durch eine Linse geleitet wird, die seine Bewegung verzögert. Eine solche Linse können wir bilden, wenn wir einen dünnen Ballon, der leicht jedem Anstoss, der ihn von aussen trifft, nachgiebt, mit irgend einem Gase füllen, das schwerer als die Luft ist. Ein mit Kohlensäure gefüllter Collodium- oder dünner Kautschukballon *B* (Fig. 10 a. f. S.) entspricht diesem Zwecke. Ich hänge jetzt meine Uhr *w* dicht an der Linse auf; hinter ihr befindet sich mein, mit dem Glastrichter *ff'* bewaffnetes Ohr. Bewege ich meinen Kopf hin und her, so finde ich bald eine Stellung, in der das Ticken besonders laut klingt. Hier ist in der That der Brennpunkt der Linse. Entferne ich mein Ohr von diesem Brennpunkte, so nimmt die Stärke des Schalls

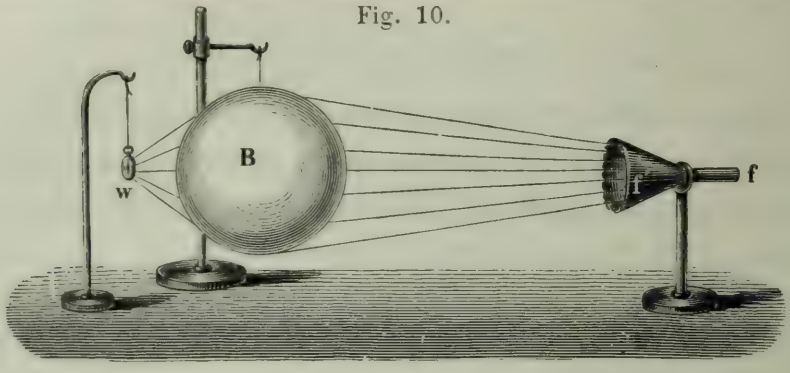
---

[1]) Als sich Herr Wheatstone dicht vor den oberen Theil der Mauer des Londoner Colosseums stellte, eines runden Gebäudes von $43\frac{1}{2}$ m Durchmesser, fand er, dass ein von ihm gesprochenes Wort oftmals wiederholt wurde. Ein einfacher Ausruf klang wie ein schallendes Gelächter, während das Zerreissen eines Stückchens Papier einem Hagelwetter glich.

[2]) Poggendorff's Annalen, Bd. LXXXV, Seite 378; Philosoph. Mag. vol. V, pag. 73.

ab; ist mein Ohr im Brennpunkte und wird der Ballon entfernt, so wird das Ticken schwächer; wird der Ballon

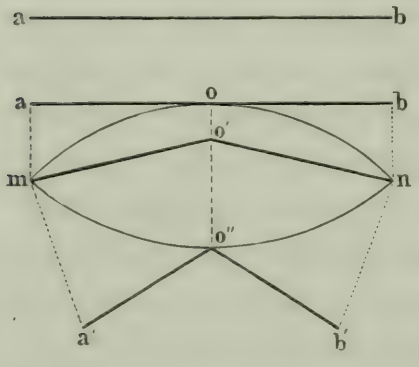
Fig. 10.



an seinen früheren Ort zurückgebracht, so wird es wieder stärker. Die Linse macht es mir möglich, das Ticken deutlich zu hören, während es ohne dieselbe vollkommen unhörbar wäre [1]).

Durch Fig. 11 kann man verstehen, wie eine Schallwelle so durch eine Linse convergent gemacht werden kann. Es sei *mono''* ein Querschnitt der Schalllinse und *ab* ein Theil der Schallwelle, die sich ihr aus einiger Entfernung nähert. Der mittlere Punkt *o* der Welle berührt die Linse zuerst und wird zuerst von ihr verzögert. Unterdessen haben auch die Enden *a* und *b*, die sich noch durch die Luft bewegten, den Ballon in *m* und *n* erreicht, während der mittlere Punkt *o*, der seinen Weg durch das schwerere innere Gas verfolgt, nur *o'* erreicht hat. Daher wird die Welle bei *o'* gebrochen, und

Fig. 11.



[1]) Eine vollkommenere Methode, um die Brechung des Schalls zu beweisen, ist in der sechsten Vorlesung beschrieben.

da die Bewegung senkrecht gegen die Stirnfläche der Welle fortschreitet, so gehen nun die beiden Hälften über einander. Die Convergenz der beiden Hälften der Welle wird vermehrt, wenn sie die Linse verlassen. Denn wenn o' bis nach o'' gekommen ist, so werden die beiden Enden a und b bis zu einer grösseren Entfernung vorgedrungen sein, z. B. nach a' und b'. Bald darauf werden die beiden Hälften der Welle einander kreuzen, oder mit anderen Worten in einem Brennpunkte zusammen kommen, wo die Luft von der Summe der Bewegungen der beiden Wellen erregt wird [1]).

§. 7. Beugung des Schalls: Grosse Explosionen liefern den Beweis.

Wenn eine lange Meereswelle einem einsamen Felsen auf ihrem Wege begegnet, so steigt sie an dem Felsen auf und umschliesst ihn rings herum. Thatsachen dieser Art bewogen Newton, die Wellentheorie des Lichtes zu verwerfen. Er schloss, dass, wenn das Licht eine Folge von Wellenbewegung wäre, wir keinen Schatten haben könnten, denn die Lichtwellen würden sich um undurchsichtige Körper fortpflanzen, wie die Wasserwelle um den Felsen. Seitdem ist erwiesen worden, dass sich Lichtwellen um undurchsichtige Körper beugen; doch haben wir damit jetzt hier nichts zu thun. Eine Schallwelle beugt sich ebenfalls um ein Hinderniss, obgleich sie bei ihrer Verbreitung hinter dem Hinderniss an Stärke ab-

[1]) Der Einfachheit wegen habe ich die Welle bei o' als gebrochen und ihre zwei Hälften als gerade Linien gezeichnet. In der That ist aber die Oberfläche der Welle eine Curve, die gegen ihre Fortpflanzungsrichtung concav ist.

nimmt und so dasselbe einen partiellen „Schallschatten“ hervorbringt. Jeder, der einmal gehört hat, wie ein Eisenbahnzug durch Einschnitte und lange Tunnel hindurch fährt, hat die grossen Verschiedenheiten in der Stärke des Schalls beobachtet. Das Dazwischentreten eines Hügels in den Alpen genügt, um den Schall eines Wasserfalls merklich zu schwächen; er vermag das Läuten der Kuhglocken gänzlich zu ersticken. Und doch ist der Schatten des Schalls nur partiell und der Zeiger an der Schiessscheibe hört stets die Explosion, obgleich er vor der Kugel geschützt ist. Das merkwürdigste Beispiel dieser Beugung der Schallwellen ereignete sich in Erith nach der furchtbaren Explosion eines Pulvermagazins im Jahre 1864. Das Dorf Erith liegt einige Meilen vom Magazine entfernt, aber fast in allen Häusern waren die Fenster gesprungen, und es war bemerkenswerth, dass die der Quelle der Explosion abgewendeten Fenster fast ebenso gelitten hatten, wie die ihr zugekehrten. In der Kirche in Erith waren die Fenster in Bleirahmen eingefügt, und da diese einigermaassen biegsam sind, so konnten die Fenster dem Drucke nachgeben, ohne dass viel Glasscheiben zersprengt wurden. Als die Schallwelle die Kirche erreichte, theilte sie sich nach rechts und links, und für einen Augenblick war die Kirche von einem Gürtel stark verdichteter Luft umgeben, die alle ihre Fenster vorn und hinten nach innen presste. Nach der Verdichtung dehnte sich ohne Zweifel die Luft in der Kirche aus und strebte die Fenster in ihre erste Lage zurückzubringen. Das Eindrücken der Fenster erzeugte indess nur eine schwache Verdichtung der ganzen Luftmasse in der Kirche; der Rückdruck war daher nur schwach im Vergleich zu der Kraft des Zusammenpressens und

genügte nicht, um die Wirkung des letzteren aufzuheben [1]).

§. 8. Geschwindigkeit des Schalls: Beziehung zur Dichtigkeit und Elasticität der Luft.

Zwei Bedingungen bestimmen die Geschwindigkeit der Fortpflanzung einer Schallwelle: die Elasticität und die Dichtigkeit des Mediums, durch das die Welle fortschreitet. Die Elasticität der Luft wird durch den Druck gemessen, der auf ihr lastet oder dem sie das Gleichgewicht hält. Auf der Meeresfläche ist dieser Druck gleich dem einer Quecksilbersäule von ungefähr 76 cm Höhe. Auf dem Gipfel des Mont Blanc ist der Barometerstand nicht viel höher als die Hälfte und folglich ist die Elasticität der Luft auf dem Gipfel des Berges nicht viel mehr als halb so gross wie auf dem Meeresspiegel.

Könnten wir die Elasticität der Luft vermehren, ohne zu gleicher Zeit ihre Dichtigkeit zu vermehren, so würde die Geschwindigkeit des Schalls wachsen. Oder, liessen wir die Elasticität constant bleiben, verminderten aber die Dichtigkeit, so würden wir die Geschwindigkeit des Schalls vermehren. Erwärmen wir die Luft in einem verschlossenen Gefässe, wo sie sich nicht ausdehnen kann, so vermehrt sich ihre Elasticität, während

[1]) Die Explosion einer mit Pulver beladenen Barke auf dem Regents Park Canal rief vor einigen Jahren ähnliche Wirkungen hervor, wie die in §. 7 erwähnten. Die Schallwelle beugte sich um die Häuser und zerbrach Fenster auf der Hinterseite, der Zusammenfluss der verschiedenen Wellentheile zeigte sich an einzelnen Punkten durch vermehrte locale Wirkung. Nahe an der Stelle, wo die Explosion auftrat, war das unverbrauchte Pulver in der Welle, und in Folge dessen war das zerstörte Thorwächterhaus rings herum von einem schwarzen Kohlengürtel umschlossen.

ihre Dichtigkeit unverändert bleibt. Durch so erwärmte Luft geht der Schall schneller als durch kalte Luft. Kann sich die Luft frei ausdehnen, so wird ihre Dichtigkeit durch Erwärmen vermindert, während ihre Elasticität dieselbe bleibt, und durch solche Luft kann der Schall schneller als durch kalte Luft gehen. Dies ist der Fall bei unserer Atmosphäre, wenn sie durch die Sonne erwärmt wird.

Die Geschwindigkeit des Schalls in Luft „von der Temperatur von 0 Grad“ ist in der Secunde 332,4 m.

Bei allen niedrigeren Temperaturen ist die Geschwindigkeit kleiner, und bei allen höheren grösser. Der verstorbene Wertheim hat die Geschwindigkeit des Schalls in Luft von verschiedenen Temperaturen bestimmt, wie folgt:

Temperatur der Luft	Geschwindigkeit des Schalls
0,5°	332,3 m
2,1	338,8
8,5	338,1
12,0	339,4
26,6	347,7

Bei einer Temperatur von einem halben Grade über 0° beträgt die Geschwindigkeit 332,3 m in der Secunde; bei einer Temperatur von 26,6° über 0° beträgt sie 347,7 m in der Secunde. Dies ergiebt also 15,4 m mehr auf 26°, d. h. eine Zunahme an Geschwindigkeit von ungefähr 0,6 m auf jeden einzelnen Centigrad.

Bei derselben Elasticität ist die Dichtigkeit des Wasserstoffgases bei weitem geringer als die der Luft, und in Folge dessen übertrifft die Geschwindigkeit des Schalls im Wasserstoff seine Geschwindigkeit in der Luft bei weitem. Der umgekehrte Fall tritt bei der schweren Kohlensäure ein. Wenn Dichtigkeit und Elasti-

cität in demselben Verhältnisse wachsen, wie es das Gesetz von Boyle für die Luft beweist, so müssen sich ihre Wirkungen gegenseitig aufheben, wenn die Temperatur constant erhalten wird; so würde, wenn die Temperatur auf den höchsten Spitzen der Alpen und an der Mündung der Themse dieselbe wäre, auch die Geschwindigkeit des Schalls an beiden Orten dieselbe sein. Da aber die obere Luft kälter als die untere ist, so ist die Geschwindigkeit auf den Bergspitzen in der That geringer als auf der Meeresfläche. Um dieses Resultat bestimmter auszudrücken, sagen wir, die Geschwindigkeit ist der Quadratwurzel der Elasticität der Luft direct proportional; sie ist ferner der Quadratwurzel der Dichtigkeit der Luft umgekehrt proportional. Folglich, da bei Luft von constanter Temperatur Elasticität und Dichtigkeit in demselben Verhältnisse wachsen und entgegengesetzt wirken, so wird die Geschwindigkeit des Schalls nur dann von einer Aenderung der Dichtigkeit beeinflusst, wenn diese von einem Wechsel der Temperatur begleitet ist.

Kein Irrthum ist allgemeiner, als dass man annimmt, die Geschwindigkeit des Schalls würde durch die Dichtigkeit vermehrt. Der Irrthum ist durch das Missverständniss der Thatsache entstanden, dass in festen und flüssigen Körpern die Geschwindigkeit grösser ist, als in Gasen. In Folge der grossen Elasticität dieser Körper im Verhältnisse zu ihrer Dichtigkeit geht der Schall schnell durch sie hindurch. Unter sonst gleichen Bedingungen bewirkt eine Vermehrung der Dichtigkeit immer eine Abnahme der Geschwindigkeit. Wäre die Elasticität des Wassers, die durch seine Zusammendrückbarkeit gemessen wird, nur der der Luft gleich, so würde die Geschwindigkeit des Schalls im

Wasser, statt mehr als vier Mal so gross zu sein als die Geschwindigkeit in der Luft, nur ein kleiner Bruchtheil dieser Geschwindigkeit sein. So muss man sowohl die Dichtigkeit, als auch die Elasticität immer berücksichtigen; da die Geschwindigkeit des Schalls durch keine von beiden allein bestimmt wird, sondern nur durch ihr Verhältniss zu einander. Von der Wirkung geringerer Dichtigkeit und grosser Elasticität giebt der Lichtäther ein höchst lehrreiches Beispiel, indem er die Schwingungen des Lichtes nicht mit der Geschwindigkeit von so und so viel Meter, sondern von etwa 300 000 km in der Secunde fortführt.

Wir könnten Stunden mit dem einfachen Berichten der Arbeiten ausfüllen, die man zur genauen Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in der Luft gemacht hat. Die Frage hat die Aufmerksamkeit der Gelehrten in England, Frankreich, Deutschland, Italien und Holland beschäftigt. Aber den französischen und holländischen Gelehrten verdanken wir die Anwendung der vollkommensten experimentellen Hülfsmittel zur Lösung dieses Problems. Sie neutralisirten den Einfluss des Windes vollständig, sie zogen den Barometerstand, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft in Betracht. Man liess den Schall zu gleicher Zeit von zwei entfernten Stationen ausgehen, und er wanderte so von Station zu Station durch dieselbe Luft. Die Entfernung zwischen den Stationen wurde durch genaue trigonometrische Beobachtungen bestimmt, und es wurden Mittel ersonnen, um möglichst genau die Zeit zu messen, die der Schall brauchte, um von einer Station zur anderen zu gelangen. Dividirte man mit dieser in Secunden ausgedrückten Zeit in die in Metern gemessene Entfernung, so ergab sich die Geschwindigkeit des

Schalls in der Luft bei einer Temperatur von 0° gleich 332,4 m in der Secunde.

Die Zeit, in der das Licht alle irdischen Entfernungen durchmisst, ist verschwindend klein; bei den eben besprochenen Versuchen wurde der Moment der Explosion durch den Blitz einer Kanone bezeichnet; die Zeit, die der Schall brauchte, um von Station zu Station zu gelangen, entsprach dem Zeitraume zwischen der Erscheinung des Blitzes und der Ankunft des Schalls. Ist die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft einmal bestimmt, so ist es klar, dass wir sie umgekehrt zur Bestimmung von Entfernungen benutzen können. Beobachten wir z. B. das Intervall zwischen der Erscheinung des Blitzes und der Ankunft des ihn begleitenden Donnerschlages, so können wir sogleich die Entfernung des Ortes der Entladung angeben. Nur wenn das Intervall zwischen Blitz und Donner kurz ist, hat man Gefahr vom Blitze zu befürchten.

§. 9. Theoretische Geschwindigkeit von Newton berechnet. — La Place's Verbesserungen.

Ich komme jetzt zu dem schwierigsten Punkte in der ganzen Theorie des Schalls. Die Geschwindigkeit in der Luft ist durch directe Versuche bestimmt worden; da wir aber die Elasticität und Dichtigkeit der Luft kennen, so können wir auch ohne einen Versuch die Geschwindigkeit berechnen, mit der eine Schallwelle in ihr fortgepflanzt wird. Sir Isaak Newton machte diese Berechnung und fand die Geschwindigkeit bei 0 Grad gleich 279,4 m in der Secunde. Diese ist etwa um $^1/_6$ weniger, als die directe Beobachtung für die Geschwindigkeit festgestellt hat, und die seltsamsten Hypothesen

wurden aufgestellt, um diese Abweichung zu erklären. Newton selbst warf die Vermuthung auf, dass der Schall nur Zeit zu seiner Fortpflanzung bei seinem Uebergange von Theilchen zu Theilchen braucht, dass er sich aber augenblicklich durch die Theilchen selbst hindurch bewegt. Er nahm dann an, dass nur $^1/_6$ der Linie, durch die der Schall ginge, von Lufttheilchen angefüllt wäre, und suchte so die Differenz in der Geschwindigkeit auszugleichen. Das Gesuchte und Geniale dieser Annahme erweckte Zweifel; andere Theorien wurden daher aufgestellt, aber der grosse französische Mathematiker La Place löste zuerst das Räthsel. Ich will mich bemühen, Sie mit seiner Lösung vollkommen vertraut zu machen.

In diesen starken Glascylinder *TU*, Fig. 12, der innen genau cylindrisch und ganz glatt ist, passt ein luftdichter Stempel. Stosse ich den Stempel hinunter, so presse ich die Luft unter ihm zusammen, und dadurch wird Wärme entwickelt. Befestige ich ein Stückchen Zündschwamm an dem Ende des Stempels, so kann ich es durch die, durch den Druck erzeugte Hitze entzünden. Tauche ich ein Stückchen Watte in Schwefelkohlenstoff und befestige es an dem Stempel, so beobachtet man, wenn der letztere niedergedrückt wird, einen Lichtblitz in der Röhre in Folge der Entzündung des Schwefelkohlenstoffdampfes. So ist bewiesen, dass bei der Zusammenpressung der Luft Wärme erzeugt wird. Durch einen anderen Versuch kann ich Ihnen beweisen, dass bei Verdünnung der Luft sich dagegen Kälte entwickelt. Diese messingene Büchse enthält verdichtete Luft. Ich öffne

Fig. 12.

den Hahn und lasse die Luft gegen ein Thermometer strömen; das Sinken des Quecksilbers des Instrumentes beweist die Abkühlung der Luft.

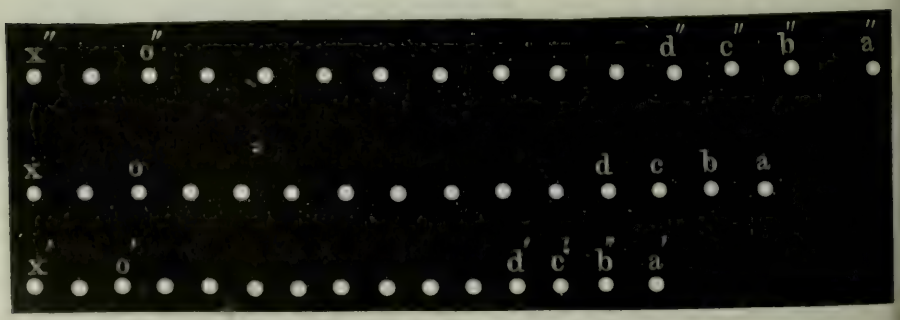
Alles, was Sie von der Fortpflanzung einer Schallwelle durch die Luft gehört haben, wird noch lebendig in Ihrer Erinnerung sein. Indem der Stoss vorwärts geht, drückt er die Lufttheilchen zusammen, und zwei Resultate ergeben sich aus dieser Zusammendrückung der Luft. Erstlich wird ihre Elasticität durch die einfache Vermehrung ihrer Dichtigkeit gesteigert. Zweitens wird ihre Elasticität durch die, bei der Zusammendrückung entwickelte Wärme vermehrt. Newton zog allein die Aenderung der Elasticität in Folge einer Aenderung der Dichtigkeit und nur diese in Betracht. Wir haben aber noch neben der von Newton in seinen Berechnungen berücksichtigten Elasticität eine neu hinzukommende Elasticität in Folge der durch den Schall selbst verursachten Temperaturveränderungen. Werden beide in Betracht gezogen, so stimmen die berechnete und die beobachtete Geschwindigkeit vollkommen überein.

Ohne die grösste Vorsicht können wir aber hier in einen schweren Irrthum verfallen. Der Geist muss in der That bei der Beschäftigung mit der Natur immer wachsam sein, um alle in Frage kommenden Gesichtspunkte zu erfassen; sonst erfahren wir bald, dass unsere Vorstellungen nicht mit den Thatsachen übereinstimmen. Die Vermehrung der Geschwindigkeit, die durch den Wechsel der Temperatur der Schallwelle selbst hervorgerufen wird, ist vollkommen von der Vermehrung verschieden, die durch die Erwärmung der ganzen Masse der Luft entsteht. Die durchschnittliche Temperatur der Luft wird nicht durch die Schallwellen verändert. Wir können keine verdichtete Welle herstellen, ohne zu-

gleich eine verdünnte zu haben; doch wird die Temperatur in der Verdünnung um ebenso viel vermindert, wie sie bei der Verdichtung erhöht wird. Nehmen wir nun an, dass die Atmosphäre in solche Verdichtungen und Verdünnungen mit ihren verschiedenen Temperaturen abgetheilt sei, so würde ein von aussen kommender Ton, der durch eine solche Atmosphäre ginge, in den letzteren um ebenso viel verzögert, wie in den ersteren beschleunigt werden, und es könnte keine Aenderung der durchschnittlichen Geschwindigkeit aus einer derartigen Vertheilung der Temperatur entstehen.

Woraus entspringt also die von La Place angedeutete Vermehrung? Ich möchte Sie ersuchen, mir mit der gespanntesten Aufmerksamkeit zu folgen, während ich Ihnen diesen verwickelten Punkt klar zu machen versuche. Wird Luft zusammengepresst, so wird ihr Volumen geringer; vermindert sich der Druck, so dehnt sich das Volumen aus. Die Kraft, die dem Drucke widersteht und die Ausdehnung bewirkt, ist die elastische Kraft der Luft. So presst ein äusserer Druck die Lufttheilchen zusammen; ihre eigene elastische Kraft hält sie aus einander, und die Theilchen sind im Gleichgewicht, wenn diese beiden Kräfte im Gleichgewicht sind. Da-

Fig. 13.



durch wird der äussere Druck zum Maass für die elastische Kraft. Die mittlere Reihe von Punkten (Fig. 13) mag

eine Reihe von Lufttheilchen darstellen, die sich in Ruhe zwischen den Punkten a und x befinden. Dann wird vermöge der elastischen Kraft, die zwischen den Theilchen besteht, wenn eines von ihnen aus seiner Ruhelage bewegt wird, die Bewegung durch die ganze Reihe fortgepflanzt. Nehmen wir nun an, dass das Theilchen a durch eine Stimmgabel oder einen anderen schwingenden Körper nach der Richtung von x hingestossen wird, so dass es zuletzt die Stellung a' in der letzten Reihe der Theilchen einnimmt. So wie die Schwingung von a beginnt, wird seine Bewegung auf b fortgepflanzt. In den folgenden Augenblicken theilt b seine Bewegung an c mit, c an d, d an e u. s. f., so dass zur Zeit, wo a die Lage a' erreicht hat, sich die Bewegung bis zu einem Punkte o', der mehr oder weniger von a' entfernt ist, auf der Linie der Theilchen fortgepflanzt haben wird. Die ganze Reihe der Theilchen zwischen a' und o' ist dann in einem Verdichtungszustande. Die Entfernung $a'o'$, welche die Bewegung während der Schwingungen von a zu a' hin zurückgelegt hat, hängt von der elastischen Kraft ab, die zwischen den Theilchen besteht. Richten Sie ihre Aufmerksamkeit auf zwei beliebige dieser Theilchen, a und b. Man kann sich die elastische Kraft zwischen ihnen als eine Spiralfeder vorstellen, und es ist klar, dass, je schlaffer diese Feder ist, um so langsamer auch die Fortpflanzung der Bewegung von a zu b ist, während die Fortpflanzung der Bewegung um so viel schneller erfolgt, je straffer die Feder ist. Was für a und b zutrifft, gilt auch für jedes andere Theilchenpaar zwischen a und o. Nun wird die Feder zwischen jedem dieser Theilchenpaare plötzlich straffer durch die Wärme, die sich auf der Verdichtungslinie entwickelt, und dadurch wird die Geschwindigkeit der Fortpflanzung

durch diese Erwärmung vermehrt. Kehren wir zu unserem früheren Versuche mit der Knabenreihe zurück, so verhält sich dies gerade so, als wenn die Muskelkraft im Arme eines jeden Knaben durch den Stoss, den er seinem Nachbar giebt, zunähme und ihn dadurch befähigte, seinen Stoss rascher abzugeben, als er es ohne diesen Zuwachs von Kraft gekonnt hätte. Der verdichtete Theil einer Schallwelle wird auf die hier beschriebene Art fortgepflanzt, und es ist klar, dass die Geschwindigkeit der Fortpflanzung durch die Wärme vermehrt wird, die sich bei der Verdichtung entwickelt.

Wir wollen jetzt auf einen Augenblick die Fortpflanzung der Verdünnung betrachten. Nehmen wir, wie vorher, an, dass die mittlere Reihe ax die Lufttheilchen in ihrer Gleichgewichtslage unter dem Drucke der Atmosphäre darstellt, und nehmen wir an, dass das Theilchen a plötzlich nach rechts gezogen wird, so dass es die Stellung a'' in der obersten Reihe der Punkte einnimmt: auf a'' folgt unmittelbar b'', auf b'' folgt c'', auf c'' d'', auf d'' e'', und so wird die Verdünnung rückwärts bis x'' fortgepflanzt, bis sie einen Punkt o'' in der Linie der Theilchen erreicht, während a seine Bewegung nach rechts vollendet hat. Warum folgt nun b'' a'', wenn a'' von ihm fortgezogen wird? Doch sicher, weil die elastische Kraft, die zwischen b'' und a'' besteht, schwächer ist als die zwischen b'' und c''. In der That wird b'' mit einer Kraft a'' nachgezogen, die dem Unterschiede der beiden Elasticitäten zwischen a'' und b'' und zwischen b'' und c'' gleich ist. Dieselbe Bemerkung bezieht sich auch auf die Bewegung von c'' nach b'', auf die von d'' nach e'', und ebenso auf die Bewegung jedes folgenden Theilchens, wenn es seinem Vorgänger nacheilt. Je grösser der Unterschied der

Elasticität auf beiden Seiten eines jeden Theilchens ist, desto schneller wird es seinem Vorgänger folgen. Und nun können Sie sehen, was die bei der Verdünnung erzeugte Kälte bewirkt. Zu der Abnahme der elastischen Kraft zwischen a'' und b'' durch die Fortziehung von a'' in eine grössere Entfernung kommt noch eine weitere Abnahme in Folge des Sinkens der Temperatur. Die entwickelte Kälte vermehrt den Unterschied der elastischen Kraft, auf dem die Fortpflanzung der Verdünnung beruht. So sehen wir, dass, weil die während der Verdichtung entwickelte Wärme auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verdichtung vermehrt, und weil die bei der Verdünnung entwickelte Kälte die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verdünnung vermehrt, die Geschwindigkeit der Schallwelle, die aus einer Verdichtung und einer Verdünnung besteht, durch die Wärme und durch die Kälte, die sie während ihres eigenen Fortschreitens entwickelt, vermehrt werden muss.

Es verlohnt sich wohl der Mühe, Ihre Aufmerksamkeit darauf zu lenken, dass die Entfernung $a'o'$, bis zu welcher die Bewegung fortgepflanzt worden ist, während sich a nach a' bewegte, bei weitem grösser sein kann, als die, welche das Theilchen selbst in der gleichen Zeit zurückgelegt hat. Die Excursion von a' kann möglicher Weise von mikroskopischer Kleinheit sein, während die Entfernung, bis zu welcher die Bewegung in der Zeit fortgepflanzt wird, während deren a' den kleinen Weg zurücklegte, viele Meter betragen könnte.

§. 10. Verhältniss der specifischen Wärmen der Luft aus der Geschwindigkeit des Schalls abgeleitet.

Nachdem wir dies, wenn auch nur im Allgemeinen festgestellt haben, möchte ich Sie ersuchen, mir zu einem entlegenen Gebiete der Physik zu folgen; freilich bedingt dies, wenn der Gegenstand auch fern zu liegen scheint, keinen Mangel des Zusammenhanges. Es werde die Temperatur einer bestimmten Menge Luft von 0^0, die in einem vollkommen unausdehnbaren Gefäss enthalten ist, um einen Grad erhöht. Dieselbe Quantität Luft mag ferner in einem Gefässe, in dem sie sich bei der Erwärmung ausdehnen kann, um 1^0 erwärmt werden, wobei zugleich der Druck auf die Luft während ihrer Ausdehnung constant erhalten wird. Die Wärmemengen, die in den beiden Fällen verwendet werden, sind verschieden. Die eine Wärmemenge ist die specifische Wärme der Luft bei constantem Volumen, die andere die specifische Wärme bei constantem Druck[1]). Wir können nun aus der berechneten und beobachteten Geschwindigkeit des Schalls in der Luft das Verhältniss dieser beiden specifischen Wärmen ableiten, ein Beweis, in wie innigem Zusammenhange die Naturerscheinungen stehen, wenn sie scheinbar auch gar keine Beziehung zu einander haben. Erheben wir die Newton'sche theoretische Geschwindigkeit ins Quadrat und ebenso die beobachtete Geschwindigkeit und theilen wir dann das grössere Quadrat durch das kleinere, so erhalten wir das besprochene Verhältniss. Nennen wir die specifische

[1]) Siehe Wärme als eine Art der Bewegung betrachtet, S. 88 bis 92.

Wärme bei constantem Volumen C_v und die bei constantem Druck C_p; nennen wir die von Newton berechnete Geschwindigkeit V und die beobachtete Geschwindigkeit V', so bewies La Place, dass

$$\frac{C_p}{C_v} = \frac{V'^2}{V^2}.$$

Führen wir die Werthe von V und V' in diese Gleichung ein und machen die Berechnung, so finden wir

$$\frac{C_p}{C_v} = 1{,}42.$$

So fand La Place, ohne dass er die specifische Wärme bei constantem Volum oder bei constantem Druck kannte, dass das Verhältniss der grösseren zur kleineren gleich 1,42 sein musste. Aus der vorhergehenden Formel geht klar hervor, dass die berechnete Geschwindigkeit des Schalls, mit der Quadratwurzel dieses Verhältnisses multiplicirt, die beobachtete Geschwindigkeit geben muss.

Indess ist bei der Bestimmung dieses Verhältnisses stillschweigend eine Annahme gemacht worden, über die wir uns klar werden müssen. Wir nehmen an, dass die bei der Zusammendrückung entwickelte Wärme in dem verdichteten Theile der Welle bleibt und dort dazu verwendet wird, um die Elasticität zu vermehren, dass also kein Theil der Wärme durch Ausstrahlung verloren geht. Würde die Luft stark ausstrahlen, so würde diese Annahme nicht gemacht werden dürfen. Die bei der Verdichtung entwickelte Wärme könnte dann nicht in der verdichteten Luft selbst bleiben. Sie würde nach allen Seiten hin ausstrahlen und bliebe zum grössten Theil in dem erkälteten und verdünnten Theile der Welle haften, der eine entsprechende Absorptionskraft

besässe. So würde sich in Folge der Strahlung die Temperatur der verschiedenen Theile der Welle ausgleichen und so die Vermehrung der Geschwindigkeit vernichtet werden, die aus La Place's Berichtigung hervorging [1]).

§. 11. Das mechanische Aequivalent der Wärme von der Geschwindigkeit des Schalls abgeleitet.

Die Frage nach der Richtigkeit des oben besprochenen Verhältnisses schliesst also die andere, scheinbar nicht damit zusammenhängende Frage in sich, ob die atmosphärische Luft irgend ein merkliches Strahlungsvermögen besitzt. Stimmt das berechnete mit dem beobachteten überein, so ist in der That der Mangel an Strahlungsvermögen bei der Luft erwiesen. Wie sollen wir nun mit Sicherheit feststellen, ob das Verhältniss richtig sei oder nicht? Durch Schlussfolgerungen, die noch besser beweisen, wie sehr die Wirkungen in der Natur mit einander verflochten sind. Die Betrachtung dieses Verhältnisses führte einen genialen Mann, Mayer, zu einer klareren und grossartigeren Vorstellung von der Verwandtschaft und Wechselwirkung der Kräfte der unorganischen und organischen Natur, als sie je ein Naturforscher vor ihm gehabt hatte. Mayer war der Erste, der in diesem Verhältniss einen Beweis für die Vernichtung der Wärme sah. Er erkannte zuerst,

---

[1]) In der That würde die schnelle Entziehung der Bewegung der Wärme aus der Verdichtung und ihre schnelle Uebertragung an die Verdünnung durch den umgebenden Lichtäther, die erstere verhindern, in der Temperatur je so hoch zu steigen, und die letztere so tief zu fallen, als wenn keine Ausstrahlungskraft vorhanden wäre.

dass der Ueberschuss der specifischen Wärme bei constantem Druck über dieselbe bei constantem Volumen (0,42 Einheiten) die Wärmemenge ist, die für die, zur Ausdehnung des Gases erforderliche Arbeit verbraucht wird. Mayer nahm an, dass die Luft seitlich begrenzt sei und nur in verticaler Richtung sich ausdehnen könne und in dieser Richtung nur das Gewicht der Atmosphäre zu tragen habe, und versuchte nun genau die Wärmemenge zu berechnen, die bei dem Aufheben dieses oder eines anderen Gewichtes verbraucht wurde. Er suchte so das „mechanische Aequivalent" der Wärme zu bestimmen. Seine Anschauungen waren bei der Verbindung dieser Daten klar, aber in Betreff der numerischen Richtigkeit derselben musste er sich auf die Experimentatoren seiner Zeit verlassen. Ihre Resultate, obgleich annähernd richtig, waren doch nicht so correct, als die später von Regnault mit seiner unübertrefflichen experimentellen Geschicklichkeit unter Beihülfe der grössten Verfeinerungen der Apparate erhaltenen Werthe. Ohne im Geringsten seinen Gedankengang oder den Aufbau seiner Berechnungen zu ändern, erhält man bei der Einführung der genauen numerischen Data in die Formel Mayer's das wahre mechanische Aequivalent der Wärme.

Wie können wir nun aber so zuversichtlich von der Richtigkeit dieses Aequivalentes reden? Dies wird uns durch die Arbeiten eines Engländers ermöglicht, der zu gleicher Zeit mit Mayer über diese Frage arbeitete, und der, von dem schöpferischen Genie seines deutschen Bruders angefeuert, mit Freuden die Gelegenheit ergriff, die genialen Schlüsse desselben durch den Versuch zu prüfen. Durch die unsterblichen Versuche des Herrn Joule wurde die wechselseitige Umwandlung der mechani-

schen Arbeit und Wärme in einander zuerst endgültig festgestellt. Und „das Joule'sche Aequivalent", wie es mit Recht genannt wird, wenn man die viele Arbeit und Geschicklichkeit erwägt, die bei seiner Bestimmung aufgewendet wurde, ist fast identisch mit dem aus der Formel Mayer's abgeleiteten Aequivalent.

§. 12. Die Abwesenheit des Strahlungsvermögens der Luft von der Geschwindigkeit des Schalls abgeleitet.

Betrachten Sie nun den Weg, den wir zurückgelegt haben, das merkwürdige Labyrinth von Reflexion und Versuch, durch das wir gekommen sind. Wir gingen von den beobachteten und berechneten Geschwindigkeiten des Schalls in der atmosphärischen Luft aus. Wir fanden, dass La Place mit einer speciellen Voraussetzung aus diesen Geschwindigkeiten das Verhältniss der specifischen Wärme der Luft bei constantem Druck zu der specifischen Wärme bei constantem Volum ableitete. Wir fanden, dass Mayer aus diesem Verhältniss das mechanische Aequivalent der Wärme berechnete, und endlich fanden wir, dass Joule dasselbe Aequivalent durch directe Versuche über die Reibung der festen und flüssigen Körper bestimmte. Und welches Resultat haben wir erlangt? Die Versuche von Herrn Joule beweisen, dass die Resultate von Mayer richtig sind; sie beweisen also, dass das von La Place bestimmte Verhältniss das richtige Verhältniss ist; und indem sie dies beweisen, beweisen sie zu gleicher Zeit, dass die atmosphärische Luft kein merkliches Strahlungsvermögen besitzt. Es scheint ein weiter Schritt von dem Umrühren des Wassers oder von dem Zusammen-

reiben eiserner Platten bei den Versuchen von Joule bis zu der Strahlung der Atome in unserer Atmosphäre zu sein; beide Fragen sind aber durch diese Reihe von Schlussfolgerungen eng mit einander verbunden.

Aber der rechte physikalische Forscher begnügt sich nie mit einer Schlussfolgerung, wenn es möglich ist, sie durch einen Versuch direct zu bestätigen oder zu widerlegen. Die Richtigkeit des vorhergehenden Beweises wird dadurch bestätigt, dass man das Strahlungsvermögen der atmosphärischen Luft einer experimentellen Prüfung unterwirft. Dabei ergiebt sich, dass Versuch und Schlussfolgerung übereinstimmen; die Luft erweist sich als ein Körper, der durchaus kein Strahlungs- oder Absorptionsvermögen besitzt [1]).

Doch muss hier der Experimentator über die Fortpflanzung des Schalls durch Gase ein warnendes Wort hören. Man glaubte zu La Place's Zeit und noch lange nachher, dass alle möglichen Gase nur ein unendlich geringes Strahlungsvermögen besässen; indess hat sich jetzt die Unrichtigkeit dieser Annahme ergeben. Es schiene mir übereilt zu sein, wenn man annehmen wollte, dass bei Körpern, wie Ammoniak, Wasserdampf, schwefliger Säure und ölbildendem Gas, ihr ungemein grosses Strahlungsvermögen nicht sehr wohl mit der Formel von La Place in Widerspruch treten könnte. Wir müssen fragen, ob das von der Geschwindigkeit des Schalls in diesen Körpern abgeleitete Verhältniss der beiden specifischen Wärmen das richtige ist; und ob, wenn das richtige Verhältniss durch andere Methoden gefunden werden könnte, die Quadratwurzel desselben, mit der berechneten Geschwindigkeit multiplicirt, die beobachtete Ge-

[1]) Wärme eine Art der Bewegung, 12. Vorlesung.

schwindigkeit giebt. Von dem Augenblicke an, wo Wärme zuerst in der Verdichtung und Kälte in der Verdünnung einer Schallwelle in einem dieser Gase auftritt, beginnt auch das Strahlungsvermögen, den Unterschied in der Temperatur zu vernichten. Der verdichtete Theil der Welle wird dadurch aufgelockert und der verdünnte Theil weniger locker, als er sonst gewesen wäre, und bei einer genügend starken Strahlung müsste die Geschwindigkeit des Schalls, statt mit der Formel von La Place übereinzustimmen, sich der einfacheren Formel Newton's nähern.

§. 13. Geschwindigkeit des Schalls in Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern.

Um unsere Kenntnisse über die Fortpflanzung des Schalls durch Gase zu vervollständigen, füge ich eine Tabelle aus den ausgezeichneten Arbeiten von Dulong bei, der bei seinen Versuchen eine später zu erklärende Methode anwendete.

Geschwindigkeit des Schalls in Gasen bei der Temperatur von 0^0 C.

	Geschwindigkeit
Luft	332,7 m
Sauerstoff	317,3
Wasserstoff	1286,0
Kohlensäure	261,6
Kohlenoxyd	337,5
Stickoxydul	262,0
Oelbildendes Gas	314,2

Nach der Theorie sind die Geschwindigkeiten des Schalls im Sauerstoff und Wasserstoff der Quadratwurzel aus den Dichten der beiden Gase umgekehrt proportional. Hier finden wir diese theoretische Schluss-

folgerung durch den Versuch bestätigt. Da Sauerstoff 16 Mal so schwer als Wasserstoff ist, so muss die Geschwindigkeit des Schalls in dem letzteren Gase nach dem obigen Gesetze vier Mal so gross als im ersteren sein; da die Geschwindigkeit im Sauerstoff 317,3 ist, so würde die Berechnung im Wasserstoff 1287 ergeben. Der Versuch ergiebt, wie wir sehen, 1286.

Die Geschwindigkeit des Schalls in den flüssigen Körpern kann auf dieselbe Weise theoretisch bestimmt werden, wie Newton seine Geschwindigkeit in der Luft bestimmte; denn die Dichtigkeit einer Flüssigkeit ist leicht bestimmt, und ihre Elasticität kann man messen, wenn man sie einem Drucke aussetzt. Beim Wasser stimmen die berechneten und die beobachteten Geschwindigkeiten so genau überein, dass der Wechsel der Temperatur, den eine Schallwelle im Wasser erzeugt, keinen bemerkbaren Einfluss auf die Geschwindigkeit haben kann. Durch eine Reihe von denkwürdigen, im Genfersee angestellten Versuchen haben die Herren Colladon und Sturm die Geschwindigkeit des Schalls im Wasser bestimmt, und fanden sie gleich 1430 m in der Secunde. Durch eine Versuchsmethode, die Sie später kennen lernen werden, bestimmte der verstorbene Wertheim die Geschwindigkeit in verschiedenen flüssigen Körpern, wie die Tabelle auf folgender Seite zeigt.

Wir ersehen aus dieser Tabelle, dass der Schall sich mit verschiedener Geschwindigkeit durch verschiedene Flüssigkeiten fortpflanzt; dass ein in Wasser aufgelöstes Salz die Geschwindigkeit vermehrt, und dass Chlorcalcium dasjenige Salz ist, welches die grösste Vermehrung bewirkt. Die Versuche zeigen uns auch, dass die Geschwindigkeit im Wasser, wie in der Luft, mit der Temperatur zunimmt. Bei einer Temperatur von 15° C. z. B.

Geschwindigkeit des Schalls in flüssigen Körpern.

Name der Flüssigkeit	Temperatur	Geschwindigkeit
Seine-Wasser	15° C.	1438 m
„ „	30	1530
„ „	60	1725
Seewasser, künstliches	20	1454
Lösung von Kochsalz	18	1565
„ „ Natriumsulfat	20	1584
„ „ Natriumcarbonat	22	1585
„ „ Natriumnitrat	21	1670
„ „ Chlorcalcium	23	2000
Weingeist	20	1256
Absoluter Alkohol	23	1160
Terpentinöl	24	1213
Schwefeläther	0	1160

beträgt die Geschwindigkeit im Seinewasser 1438 m, bei 30° 1530 m und bei 60° 1725 m in der Secunde.

Ich sagte, dass man aus der Zusammendrückbarkeit einer Flüssigkeit, die durch geeignete Messungen bestimmt worden ist, die Geschwindigkeit des Schalls in der Flüssigkeit ableiten könne. Umgekehrt kann auch aus der Geschwindigkeit des Schalls in einer Flüssigkeit die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeit abgeleitet werden. Wertheim verglich eine Reihe von Zusammendrückbarkeiten, die er aus seinen Versuchen über den Schall abgeleitet hatte, mit den entsprechenden, von Grassi direct erhaltenen Werthen. Die Uebereinstimmung der berechneten und gefundenen Zahlen, wie sie sich aus der folgenden Tabelle ergiebt, ist eine Bestätigung für die Genauigkeit der von Wertheim angewendeten Methode:

	Cubische Zusammendrückbarkeit	
	nach Wertheim's Geschwindigkeit des Schalls	nach den directen Versuchen von Grassi
Meerwasser	0,0000467	0,0000436
Lösung von Kochsalz	0,0000349	0,0000321
„ „ Natriumcarbonat . . .	0,0000337	0,0000297
„ „ Natriumnitrat	0,0000301	0,0000295
Absoluter Alkohol	0,0000947	0,0000991
Schwefeläther	0,0001002	0,0001110

Je grösser der Widerstand ist, den eine Flüssigkeit der Zusammendrückung entgegensetzt, desto schneller und kräftiger wird sie nach der Zusammendrückung zu ihrem ursprünglichen Volumen zurückkehren. Je geringer also ihre Zusammendrückbarkeit ist, desto grösser ist die Elasticität, und um so grösser ist unter sonst gleichen Bedingungen dann folglich auch die Geschwindigkeit des Schalls durch die Flüssigkeit.

Wir müssen nun die Fortpflanzung des Schalls durch feste Körper untersuchen. Hier gilt als allgemeines Gesetz, dass die Elasticität im Verhältniss zu der Dichtigkeit grösser als in Flüssigkeiten ist, und folglich auch die Fortpflanzung des Schalls schneller erfolgt. In der Tabelle auf folgender Seite habe ich die Geschwindigkeit des Schalls in verschiedenen Metallen nach den Bestimmungen von Wertheim mitgetheilt.

Als allgemeine Regel gilt, dass die Geschwindigkeit des Schalls durch die Metalle bei zunehmender Temperatur abnimmt; indess macht das Eisen eine auffallende Ausnahme von dieser Regel, aber nur innerhalb gewisser Temperaturgrenzen. Während z. B. bei einer Erhöhung der Temperatur von 20° C. bis 100° C. beim Kupfer die Geschwindigkeit von 3558 auf 3295 fällt, so bedingt dieselbe Erhöhung beim Eisen eine Zunahme der Geschwindigkeit von 5033 auf 5301. Zwischen

Geschwindigkeit des Schalls in Metallen.

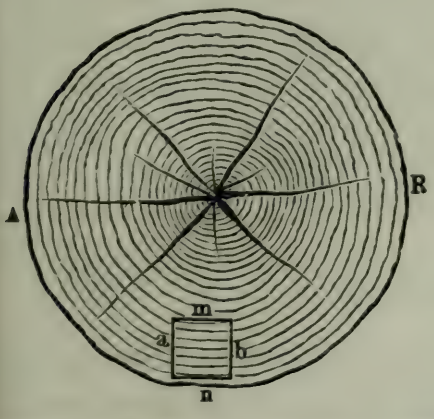
Name des Metalles	bei 20° C.	bei 100° C.	bei 200° C.
Blei	1229 m	1205	—
Gold	1744	1724	1736
Silber	3285	2640	2475
Kupfer	3558	3295	2950
Platin	2688	2573	2463
Eisen	5033	5301	4687
Eisendraht (gewöhnlicher) .	4908	5101	—
Gussstahl	4989	4925	4789
Stahldraht (englischer) . .	4719	5246	5000
Stahldraht	4088	5017	—

100° und 200° sehen wir indess, dass die Geschwindigkeit im Eisen von der letzteren Zahl auf 4687 fällt. Daher wird im Eisen bis zu einer gewissen Grenze die Elasticität durch die Erwärmung vermehrt; jenseits dieser Grenze sinkt sie. Silber bietet ein Beispiel derselben Art.

Der Unterschied der Geschwindigkeit in Eisen und Luft kann durch folgenden lehrreichen Versuch gezeigt werden. Wählen Sie eine der längsten, horizontalen Eisenstangen, wie sie in Hyde-Park als Einfriedigungen benutzt werden, und lassen Sie die Eisenstange an dem einen Ende durch einen Gehülfen anschlagen, während Ihr Ohr dicht an der Eisenstange aber in grosser Entfernung von dem angeschlagenen Punkte sich befindet. Dann werden zwei Töne nach einander Ihr Ohr treffen, von denen der erste durch das Eisen, der zweite durch die Luft fortgepflanzt wurde. Dieselbe Erscheinung fand Biot bei seinen Versuchen in den Eisenröhren der Wasserleitung von Paris.

Die Fortpflanzung des Schalls durch einen festen Körper hängt bis zu einem gewissen Grade von der Anordnung seiner Moleküle ab. Ist der Körper homogen und structurlos, so wird der Schall nach allen Richtungen gleich schnell fortgepflanzt; dies ist aber nicht der Fall bei Körpern, welche, wie in der unorganischen Natur die Krystalle, in der organischen die Bäume, eine bestimmte Structur besitzen. Auch für andere Erscheinungen, als die des Schalls, gilt dasselbe. Unterwirft man z. B. eine Holzkugel magnetischen Kräften, so wird sie nicht nach allen Richtungen gleich beeinflusst; sie wird zwar immer von dem Magnetpole abgestossen, aber am stärksten, wenn die Kraft in der Richtung der Fasern wirkt. Ebenso wird die Wärme durch Holz in verschiedenen Richtungen ungleich schnell geleitet. Die Leitungsfähigkeit ist am grössten in der Richtung der Fasern; und sie geht leichter radial durch die Holzschichten als tangential. Das Holz besitzt also drei ungleiche Axen der Wärmeleitung; dieselben fallen mit den von Savart entdeckten Elasticitätsaxen zusammen. Die Herren Wertheim und Chevandier haben die Schallgeschwindigkeit in der Richtung dieser drei Axen bestimmt und die Resultate erhalten, welche die Tabelle auf folgender Seite enthält.

Fig. 14.



Schneiden wir daher einen Würfel nahe der Rinde aus dem Holze eines gut gewachsenen Baumes, wo die Ringe auf einer kurzen Strecke als gerade angesehen werden können, so ist, wenn AR (Fig. 14) der Quer-

Geschwindigkeit des Schalls in Holz.

Name des Holzes	Der Faser entlang	Senkrecht zu den Ringen	Parallel den Ringen
Akazie	4,719	1,476	1,353
Kiefer	3,363	1,337	0,784
Birke	3,344	1,831	1,416
Eiche	3,850	1,571	1,119
Tanne	3,324	1,406	0,794
Ulme	4,121	1,423	1,014
Sycomore	4,464	1,500	1,137
Esche	4,694	1,393	1,264
Erle	4,670	1,369	1,044
Espe	5,085	1,616	0,911
Ahorn	4,100	1,539	1,037
Pappel	4,285	1,404	1,051

schnitt des Baumes ist, die Geschwindigkeit des Schalls in der Richtung *mn* durch einen solchen Würfel grösser als in der Richtung *ab*.

Die vorstehende Tabelle beweist schlagend den Einfluss der Molekularstructur. Die grössere Zahl der Krystalle zeigt ähnliche Verschiedenheiten. In diesen Körpern sind meist die Moleküle in verschiedenen Richtungen verschieden dicht an einander geordnet, und wo dieser Fall eintritt, findet man sicherlich Verschiedenheiten im Durchgange und im Auftreten der Wärme, des Lichtes, der Elektricität, des Magnetismus und des Schalls.

§. 14. Hooke's Vorahnung des Stethoskopes.

Ich will diese Vorlesung über die Fortpflanzung des Schalls durch Gase, Flüssigkeiten und feste Körper mit einem schönen Citat aus den Schriften des grossen

Denkers Dr. Robert Hooke beschliessen. Sie werden bemerken, dass die Theorie des Stethoskopes in den folgenden Sätzen ausgesprochen ist, und kaum dürfte noch anderswo die Thätigkeit des Geistes, welche in der Wissenschaft bei allen grossen Entdeckern dem Experiment vorausgeht und dasselbe begleitet, so klar zu Tage treten wie hier.

„Es ist vielleicht möglich", schreibt Hooke, „die inneren Bewegungen und Thätigkeiten von Körpern durch ihren Ton zu entdecken. Wie wir in einer Uhr die Schläge der Unruhe und das Laufen der Räder und das Schlagen der Hämmer und das Schleifen der Zähne und viele andere Geräusche hören; wer weiss, ob wir nicht ebenso die Bewegungen der inneren Theile der Körper, seien sie Thiere, Pflanzen oder Mineralien, durch den Ton erkennen könnten, welchen sie von sich geben; ob wir nicht ferner die Vorgänge in den verschiedenen Organen und Kammern des menschlichen Körpers auffinden und so entdecken könnten, welche Instrumente oder Maschinen in Unordnung sind, welche Theile des Werkes nur zu gewissen Zeiten laufen und zu anderen nicht und Aehnliches; ob wir nicht endlich in den Pflanzen und Vegetabilien durch das Geräusch die Pumpen entdecken könnten, welche den Saft heben, die Klappen, welche ihn aufhalten und das Strömen desselben aus einem Gange in den anderen und Aehnliches. Ich könnte noch weiter fortfahren, aber kaum ohne roth zu werden, wenn ich mir überlege, wie die meisten Menschen hierüber denken, und doch möchte ich alle diese Aufschlüsse nicht für ganz unmöglich halten, wenn sie auch von der Mehrzahl der Menschen verspottet und für wahnsinnig, dumm und phantastisch gehalten werden möchten; halte ich sie für unmöglich, so wird meine Kenntniss von den-

selben nicht wesentlich gefördert, halte ich sie aber für möglich, so könnte dies vielleicht eine Veranlassung sein, Dinge zu beachten, an welchen ein Anderer ohne Weiteres gleichgültig vorbeigeht. Ich bin durch die Erfahrung etwas mehr ermuthigt worden, da ich die Schläge des menschlichen Herzens sehr deutlich gehört habe, und man auch sehr häufig die Bewegung der Luft in den Därmen und anderen kleinen Gefässen wahrnimmt; das Stillstehen der Lungen erkennt man leicht an dem Schnaufen, das Stillstehen im Kopfe durch die summenden und pfeifenden Geräusche, das Hin- und Hergleiten der Gelenke durch Krachen u. s. f. und ähnliche Vorgänge bei der Arbeit und der Bewegung der Theile gegen einander. Auch könnte ich wohl mehr Muth bekommen, wenn ich das Zischen höre, welches ein ätzendes Mittel bei seiner Wirkung erzeugt, das Geräusch des Feuers beim Schmelzen, das des Wassers beim Sieden, das der Theile einer Glocke, nachdem ihre Bewegung für das Auge schon ganz unsichtbar geworden ist, denn für mich sind diese und andere Bewegungen nur *secundum magis minus* verschieden; um also bemerkbar zu werden, müssen entweder ihre Bewegungen verstärkt oder das zu ihrer Wahrnehmung und Unterscheidung dienende Organ empfindlicher und kräftiger gemacht werden.“

Uebersicht der ersten Vorlesung.

Der Schall einer Explosion wird durch die Luft wie eine Welle oder wie ein Anstoss fortgepflanzt.

Die auf das Trommelfell treffende Welle erschüttert dasselbe; seine Bewegung wird dem Gehörnerv mitgetheilt und durch diesen auf das Gehirn übertragen, wo sie sich als Schall bemerkbar macht.

Eine Schallwelle besteht aus zwei Theilen, in denen die Luft resp. verdichtet und verdünnt ist.

Die Fortbewegung der Schallwelle darf nicht mit der Bewegung der Theilchen verwechselt werden, die in jedem Augenblick die Welle bilden. Während des Durchganges der Welle macht jedes bei ihrer Fortpflanzung betheiligte Theilchen nur eine kleine Hin- und Herbewegung.

Die Weite dieser Hin- und Herbewegung wird die Amplitude der Schwingung genannt.

Der Schall geht nicht durch den luftleeren Raum.

Es bedarf einer gewissen Stärke des Anstosses oder der Geschwindigkeit der Schwingung, um die Schallwellen in der Luft zu erzeugen. Nothwendiger ist sie noch im Wasserstoff, da durch die grössere Beweglichkeit dieses leichten Gases die Bildung von Verdichtungen und Verdünnungen verhindert wird.

Der Schall wird in jeder Hinsicht wie das Licht reflectirt, er wird auch wie das Licht gebrochen, und er kann wie das Licht durch geeignete Linsen gesammelt werden.

Der Schall wird auch gebeugt, wenn sich die Schallwelle um Hindernisse windet; diese Hindernisse geben indess einen partiellen „Schallschatten".

Echos werden durch die reflectirten Schallwellen erzeugt.

Vier verschiedene Dinge sind beim Schall und bei dem Medium, das er durchläuft, zu beachten: Stärke, Geschwindigkeit, Elasticität und Dichtigkeit.

Die Stärke ist dem Quadrat der Amplitude proportional, wie wir es vorher definirt haben.

Sie ist auch dem Quadrat der Maximalgeschwindigkeit der schwingenden Lufttheilchen proportional.

Verbreitet sich der Schall von einem kleinen Körper aus in der freien Luft, so nimmt die Stärke ab, wie das Quadrat der Entfernung von dem Körper zunimmt.

Ist die Schallwelle von einer Röhre mit glatter innerer Oberfläche begrenzt, so kann sie auf bedeutende Entfernungen ohne merklichen Verlust der Dichtigkeit fortschreiten.

Die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft hängt von dem Verhältniss der Elasticität der Luft zu ihrer Dichtigkeit ab. Je grösser die Elasticität, desto schneller die Fortpflanzung; je grösser die Dichtigkeit, desto langsamer ist die Fortpflanzung.

Die Geschwindigkeit ist der Quadratwurzel aus der Elasticität direct proportional; sie ist der Quadratwurzel aus der Dichtigkeit umgekehrt proportional.

Wenn daher Elasticität und Dichtigkeit sich in demselben Verhältniss ändern, so wird die eine Aenderung die andere für die Geschwindigkeit des Schalls neutralisiren.

Dass beide sich in der Luft in demselben Verhältniss ändern, wird durch das Gesetz von Boyle und Mariotte bewiesen; daher ist die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft von der Dichtigkeit der Luft unabhängig.

Damit aber dieses Gesetz anwendbar ist, muss die dichte und die dünne Luft dieselbe Temperatur haben.

Die Stärke des Schalls hängt von der Dichtigkeit der Luft ab, in der er erzeugt wird, und nicht von der der Luft, in welcher er gehört wird.

Die Geschwindigkeit des Schalls in Luft von 0° C. ist 332,7 m in der Secunde, sie nimmt um ungefähr 0,6 m bei einer Temperaturerhöhung um einen Grad Celsius zu.

Ist daher die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft ermittelt, so kann die Temperatur der Luft leicht berechnet werden.

Die Entfernung einer abgefeuerten Kanone oder eines Blitzstrahles kann durch die Beobachtung des Intervalls zwischen dem Aufleuchten und dem Hören des Schalls bestimmt werden.

Viele alltägliche Erscheinungen lassen sich ohne Schwierigkeit auf die Thatsache zurückführen, dass der Schall eine ziemliche Zeit braucht, um einen beträchtlichen Weg in der Luft zurückzulegen. So wird z. B. das Fallen der Axt eines entfernten Holzhauers nicht gleichzeitig mit dem Schall des Schlages gehört. Das Aufblitzen einer entfernten Kanone kommt immer vor dem Schall an. Die Soldaten eines Regimentes, dem die Musiker vorangehen, können nicht gleichzeitig auftreten, weil die Töne die vorderen und die hinteren Soldaten nicht gleichzeitig erreichen.

Die Luft in dem verdichteten Theile einer Schallwelle ist wärmer, in dem verdünnten Theile kälter als ihre durchschnittliche Temperatur.

Dieser Wechsel der Temperatur, der durch den Durchgang der Schallwelle selbst erzeugt wird, vermehrt die Elasticität der Luft und erhöht die Geschwindigkeit des Schalls, die er über diejenige haben würde, wenn keine Temperaturänderung einträte.

Die von Newton berechnete Geschwindigkeit des Schalls, bei der dieser Wechsel der Temperatur nicht in Betracht gezogen war, betrug 279,4 m in der Secunde.

La Place bewies, dass man die wirkliche oder beobachtete Geschwindigkeit erhält, wenn man Newton's Geschwindigkeit mit der Quadratwurzel aus dem Verhältniss der

specifischen Wärme der Luft bei constantem Druck zu ihrer specifischen Wärme bei constantem Volum multiplicirt.

Umgekehrt kann man aus der Vergleichung der berechneten und beobachteten Geschwindigkeiten auf das Verhältniss der beiden specifischen Wärmen schliessen.

Das mechanische Wärmeäquivalent kann aus diesem Verhältniss abgeleitet werden; man hat gefunden, dass sich für dasselbe so der gleiche Werth ergiebt, wie durch directe Versuche.

Diese Uebereinstimmung führt zu dem Schlusse, dass die atmosphärische Luft kein merkliches Strahlungsvermögen besitzt. Directe Versuche ergeben dasselbe Resultat.

Die Geschwindigkeit des Schalls im Wasser ist vier Mal so gross als seine Geschwindigkeit in der Luft.

Die Geschwindigkeit des Schalls im Eisen ist siebzehn Mal so gross, als die Geschwindigkeit in der Luft.

Die Geschwindigkeit des Schalls in der Richtung der Fasern des Tannenholzes ist zehn Mal so gross, als seine Geschwindigkeit in der Luft.

Der Grund dieser weit grösseren Werthe liegt darin, dass die Elasticität der Flüssigkeiten, der Metalle und des Holzes im Verhältniss zu ihren verschiedenen Dichtigkeiten bedeutend grösser ist, als die Elasticität der Luft im Vergleich zu ihrer Dichtigkeit.

Die Geschwindigkeit des Schalls hängt bis zu einem gewissen Grade von der Molekularstructur ab. Im Holz z. B. wird er mit verschiedener Geschwindigkeit nach verschiedenen Richtungen fortgepflanzt.

Zweite Vorlesung.

Physikalischer Unterschied zwischen Geräusch und Musik. — Ein musikalischer Ton wird durch regelmässig wiederkehrende, ein Geräusch durch unregelmässige Schwingungen erzeugt. — Erzeugung musikalischer Töne durch Schläge. — Erzeugung derselben durch Luftstösse. — Erklärung der Höhe und Tiefe des Tones. — Schwingungen einer Stimmgabel. — Graphische Darstellung derselben auf berussten Glasplatten. — Optische Darstellung der Schwingungen einer Stimmgabel. — Beschreibung der Sirene. — Grenzen des Gehörs; höchste und tiefste Töne. — Bestimmung der Geschwindigkeit der Schwingungen durch die Sirene. — Bestimmung der Länge der Schallwellen. — Wellenlängen der menschlichen Stimme bei Männern und Frauen. — Fortpflanzung der Töne durch Flüssigkeiten und feste Körper.

---

§. 1. Musikalische Töne.

In unserer letzten Vorlesung haben wir die Fortpflanzung einer Schallwelle von sehr kurzer Dauer durch die Luft betrachtet. Heute haben wir uns mit andauernden Tönen zu beschäftigen und zuerst den physikalischen Unterschied zwischen Geräusch und Musik kennen zu lernen. So weit es sich nur um die Empfindung handelt, kennt Jeder den Unterschied zwischen diesen beiden Erscheinungen. Indess haben wir nun die Ursache der verschiedenen Empfindungen zu untersuchen und uns mit dem Zustande der äusseren Luft bekannt zu machen, welcher in dem einen Falle die Musik, in dem anderen das Geräusch bedingt.

Wir haben schon erfahren, dass die Stärke des Schalls in unserer Empfindung einzig und allein durch

die Schwingungsweite oder Amplitude der ausser uns schwingenden Lufttheilchen bedingt ist. Jedem einzelnen Schalleindruck, dessen wir uns bewusst werden, entspricht ausserhalb eine bestimmte Schwingungsform oder ein bestimmter Zustand der Atmosphäre. Wären unsere Organe hinlänglich entwickelt, um die Bewegungen der Luft zu sehen, durch welche der Klang einer angenehmen Stimme hindurchgeht, so erblickten wir in dieser Luft die Bewegungsbedingungen, von welchen der Wohlklang der Stimme abhängt. In der gewöhnlichen Unterhaltung tritt ebenfalls der physikalische Vorgang zuerst ein und regt den psychischen an. Die gesprochene Sprache, die uns Freude und Schmerz bereitet, welche unseren Zorn erregt und uns besänftigt, besteht während einer gewissen Zeit zwischen uns und dem Redner einzig und allein in einem rein mechanischen Zustande in der dazwischen befindlichen Luft.

Das Geräusch berührt uns wie eine unregelmässige Aufeinanderfolge von Erschütterungen. Während wir auf dasselbe lauschen, sind wir uns eines Stossens und Rüttelns des Gehörnervs bewusst, während der musikalische Ton glatt und ohne Rauhheit oder Unregelmässigkeit dahinfliesst. Wodurch wird diese Glätte erreicht? Dadurch, dass man die Impulse, welche das Trommelfell erhält, vollkommen periodisch macht. Eine periodische Bewegung ist eine solche, welche sich regelmässig wiederholt. Die Bewegung eines gewöhnlichen Pendels z. B. ist periodisch. Solche Wellen sind indess viel zu langsam, um Schallwellen zu erregen. Um einen musikalischen Ton zu erzeugen, müssen wir einen Körper wählen, der mit derselben unfehlbaren Regelmässigkeit schwingt wie das Pendel, der aber der Luft viel schnellere Impulse ertheilen kann.

Denken Sie sich zuerst eine Reihe von Impulsen, welche in regelmässigen Intervallen auf einander folgen und das Trommelfell treffen. Es wird durch den Stoss erschüttert, und ein einmal in Bewegung gesetzter Körper kann nicht sogleich wieder zur Ruhe kommen. Indess ist das menschliche Ohr so construirt, dass die Schallwahrnehmung zwar sehr schnell gedämpft wird, indess verschwindet sie nicht plötzlich, und wenn die dem Gehörnerv durch jeden einzelnen Impuls unserer Reihe ertheilte Bewegung bis zur Ankunft seines Nachfolgers andauert, so wird der Schall gar nicht aufhören. Die Wirkung jeder Erschütterung wiederholt sich und die wiederkehrenden Impulse fügen sich zu einem andauernden musikalischen Ton zusammen. Im Gegentheil sind die Impulse, welche das Geräusch hervorrufen, von unregelmässiger Stärke und Wiederkehr. Die Wirkung des Geräusches auf das Ohr ist sehr passend mit dem Eindrucke eines flackernden Lichtes auf das Auge verglichen worden. Beide sind unangenehm durch die plötzlichen und kurz abgebrochenen Eindrücke auf die entsprechenden Nerven.

Die einzige Bedingung zur Erzeugung eines musikalischen Tones ist, dass die Schallwellen in gleichen Zeitintervallen auf einander folgen. Es ist dabei völlig gleichgültig, welchen Ursprung sie haben; ist diese Bedingung erfüllt, so wird der Ton musikalisch. Wenn man z. B. eine Taschenuhr mit genügender Geschwindigkeit — etwa 100 Mal in der Secunde — ticken liesse, so würden die einzelnen Ticke ihre Individualität verlieren und zu einem musikalischen Ton zusammenfliessen. Und wenn die Schläge der Flügel einer Taube mit derselben Geschwindigkeit vollführt werden könnten, so wäre der Flug des Vogels durch die Luft von Musik

begleitet. Bei dem Colibri ist diese Geschwindigkeit erreicht; und gehen wir von den Vögeln zu den Insecten über, bei denen die Schwingungen schneller sind, so begleitet gewöhnlich ein musikalischer Ton den Flug des Insects[1]). Die Stösse einer Locomotive folgen beim Beginn ihres Laufes anfangs einander langsam, aber bald vermehrt sich ihre Geschwindigkeit so sehr, dass sie kaum noch gezählt werden können. Würde diese Zunahme fortschreiten, bis 50 oder 60 Stösse in der Secunde erfolgten, so würde die Ankunft der Maschine durch einen Orgelton von gewaltiger Kraft verkündet werden.

§. 2. Musikalische Töne durch gelinde Schläge erzeugt.

Galiläi brachte einen musikalischen Ton hervor, indem er ein Messer über den Rand eines Piasters hinführte. Die kleine Zähnung der Münze bedingte den periodischen Charakter der Bewegung. Sie bestand aus einer Reihe von Schlägen, die einander in hinreichender Geschwindigkeit folgten, um ein ununterbrochenes Tönen zu erzeugen. Jeder Schulknabe weiss, wie er einen Ton mit seinem Schieferstift hervorruft. Ich will denselben nicht gerade einen musikalischen nennen, denn dieser Ausdruck bezieht sich gewöhnlich auf einen angenehmen Eindruck, und den bringt der Schieferstift eben nicht hervor.

Man erzeugt gewöhnlich einen musikalischen Ton durch Schläge, indem man die Zähne eines rotirenden Rades schnell hinter einander gegen ein Kartenblatt

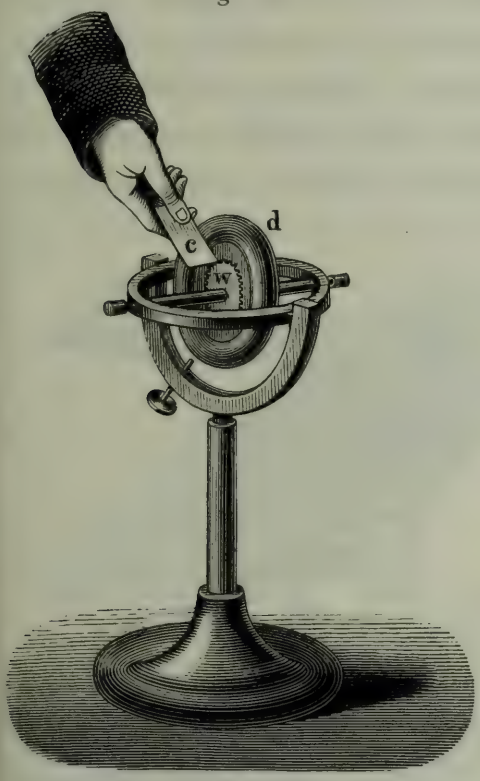
---

[1]) Nach Burmeister werden die Schwingungen durch das Eintreten und Ausstossen der Luft in und aus der Brusthöhle hervorgerufen.

schlagen lässt. Dieser Versuch wurde zuerst von dem schon erwähnten berühmten Robert Hooke[1]) und in neuerer Zeit von dem ausgezeichneten französischen Physiker Savart angestellt.

Wir wollen uns auf einfachere Versuche beschränken. Dieses Gyroskop (Fig. 15) besteht im Wesentlichen aus einem schweren Messingringe *d*, welcher den Rand einer Scheibe umgiebt, durch deren Mittelpunkt eine, gegen ihre Oberfläche senkrechte und in gut gearbeiteten Lagern laufende Stahlaxe hindurchgeht. Wird ein Faden um die Axe gewunden und kräftig abgezogen, so dreht sich der Ring schnell, und mit ihm rotirt ein kleines Zahnrad *w*. Berühre ich dieses Rad mit dem Rande einer Karte *c*, so entsteht ein äusserst hoher Ton. Vermindere ich die Drehungsgeschwindigkeit, indem ich einen Augen-

Fig. 15.

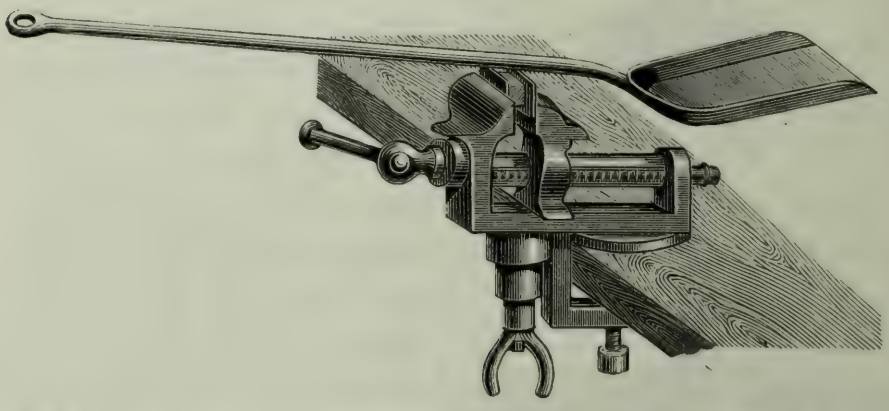


[1]) Am 27. Juli 1681: Herr Hooke zeigte einen Versuch, musikalische und andere Töne mit Hülfe der Zähne von Messingrädern zu erzeugen; diese Zähne waren gleich breit für musikalische, ungleich breit für die Töne der menschlichen Stimme. Birch's History of the Royal Society p. 96, 1757.

Der folgende Auszug ist dem „Leben von Hooke" entnommen, welches seinen nachgelassenen Werken, herausgegeben von Richard Waller, Secretär der Royal Society, 1705, vorgedruckt ist. „Im Juli desselben Jahres zeigte er (Dr. Hooke) eine Methode, musikalische und andere Töne durch das Anschlagen der Zähne von verschiedenen Messingrädern

blick meinen Daumen gegen den Ring halte, so macht sich dies sogleich durch das Tieferwerden des Tones geltend. Wird die Drehungsgeschwindigkeit noch mehr vermindert, so wird der Ton noch tiefer. So lernen wir die wichtige Thatsache kennen, dass die Höhe eines Tones von der Geschwindigkeit seiner Schwingungen abhängt [1]). Am Schlusse des Versuches hören Sie die einzelnen Schläge der Zähne gegen das Kartenblatt; ihre Aufeinanderfolge ist nicht schnell genug, um den ununterbrochenen Fluss des Schalls zu erzeugen, auf dem das Wesen der Musik beruht. Eine in eine Drehbank eingespannte und rotirende

Fig. 16.



Schraube mit einem, am Rande eingekerbten Kopfe bringt bei ihren Schlägen gegen ein Kartenblatt einen fast eben so klaren und reinen Ton hervor, wie das Zahnrad am Gyroskop.

Die Erzeugung eines musikalischen Tones durch

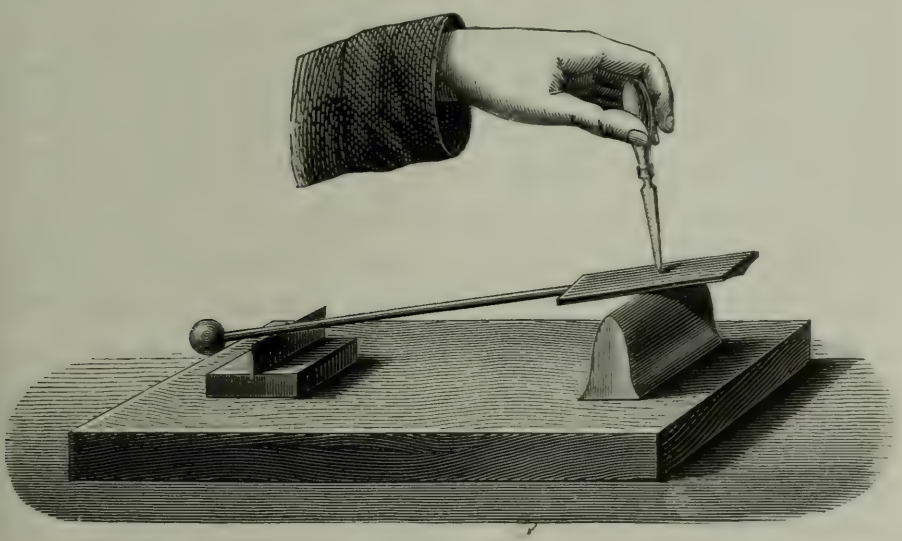
---

zu erzeugen. Die Zähne derselben standen in einem einfachen Zahlenverhältniss; die Räder drehten sich sehr schnell und man beobachtete, dass gleiche oder in einfachem Zahlenverhältniss zu einander stehende Schläge der Zähne (2 : 1 oder 4 : 3 u. s. f.) die musikalischen Töne erzeugten, ungleiche Anschläge der Zähne mehr dem Klang der Stimme beim Sprechen nahe kamen."

[1]) Galiläi fand, dass die Zahl der Einschnitte auf seiner Münze gross war, wenn er einen hohen Ton beobachtete, und schloss daraus, dass die Höhe von der Geschwindigkeit der Anstösse abhinge.

Schläge kann auch auf eine andere hübsche Art nachgewiesen werden. In diesen Schraubstock (Fig. 16) sind der Quere nach zwei Bleiplatten eingespannt, deren Ränder 6 mm von einander abstehen. Ich lege eine Messingstange quer über sie, lasse sie auf den Rändern ruhen und versetze sie in Schwingungen, indem ich sie ein wenig mit meiner Hand anstosse. Ueberlasse ich sie sich selbst, so kommt sie nach einiger Zeit zur Ruhe. Würde aber die Stange, sowie sie das Blei berührt, immer wieder durch eine vom Blei selbst ausgehende Kraft aufwärts geschleudert, so ist es klar, dass die Schwingungen andauern würden. Eine solche Kraft

Fig. 17.



tritt aber auf, wenn die Stange erhitzt ist. Berührt sie dann das Blei, so wird demselben Wärme mitgetheilt, dasselbe dehnt sich plötzlich an der Berührungsstelle nach oben aus. Die Stange wird unaufhörlich von einer Seite zur anderen geworfen, so lange sie hinlänglich warm bleibt. Ersetzen wir die Messingstange durch eine erhitzte Feuerschaufel (Fig. 16), so erhalten wir dieselbe Wirkung.

Bei dem Niederfallen auf das Blei schlägt die Stange gegen dasselbe nur schwach an; im vorliegenden Falle sind die Schläge so langsam, dass Sie dieselben leicht zählen können. Aber eine anders geformte Metallmasse (Fig. 17 a. v. S.) kann dazu gebracht werden, dass sie schneller schwingt und schneller auf einander folgende Schläge hervorbringt. Wird solch ein erhitzter „Wieger“ auf einen Bleiklotz gelegt, so steigern sich die Schläge bis zu einem lauten Gerassel. Mit der Spitze einer Feile drücke ich den Wieger gegen das Blei; dadurch werden die Schwingungen schneller, die Schläge vereinen sich zu einem tiefen musikalischen Ton. — Dieser andere Wieger schwingt schneller als der vorige, und schon vermöge seines eigenen Gewichtes bringt er ohne weiteren Druck einen musikalischen Ton hervor. Drücke ich ihn aber mit der Feile, so steigt die Tonhöhe, bis dass ein Ton von merkwürdiger Stärke und Reinheit den Saal füllt. Lassen wir mit dem Drucke nach, so sinkt sogleich die Tonhöhe. Drücken wir von Neuem, so steigt sie wieder, und so können wir durch Veränderung des Druckes bedeutende Schwankungen in der Höhe des Tones hervorrufen. Solche Wieger braucht man nicht einmal. Lassen wir die eine Seite des gereinigten viereckigen Endes dieses erwärmten Schüreisens auf dem Bleiklotz ruhen, so hören wir ein Rasseln; ruht eine andere Fläche desselben auf dem Klotz, so erklingt ein rein musikalischer Ton. Die beiden Flächen sind mit einer Feile verschieden abgeschrägt worden, um so verschieden schnelle Schwingungen zu erhalten [1]). Diese eigenthümliche Er-

[1]) Wenn eine starke Fluthwelle über einen mit Kieseln bedeckten Strand hinläuft, wie zu Blackgang Chine oder Freshwater Gate auf der Insel Wight, so werden die abgerundeten Steine durch den Anprall des Wassers am Abhange heraufgetragen und beim Rückgange der Welle

scheinung wurde von Schwartz und Trevelyan entdeckt[1]).

§. 3. Musikalische Töne durch Luftimpulse erzeugt.

Professor Robison war der Erste, der einen musikalischen Ton durch eine schnelle Aufeinanderfolge von Luftimpulsen erzeugte. Er benutzte dazu die erste Form eines Instrumentes, welches Sie bald unter dem Namen Sirene kennen lernen werden. Robison beschreibt seinen Versuch folgendermaassen: Ein Hahn war so construirt, dass er den Durchgang durch ein Rohr 720 Mal in der Secunde öffnete und schloss. Der Apparat wurde an einer Röhre zwischen dem Blasebalg und dem Windkasten einer Orgel angebracht. Man liess die Luft langsam durch diese Röhre hindurchströmen, indem der Hahn geöffnet wurde. Wurde dies 720 Mal in einer Secunde wiederholt, so hörte man ganz schwach den Ton zweigestrichen g, so weich, wie wenn er von einer hellen Frauenstimme gesungen würde. Wurde die Geschwindigkeit auf 360 reducirt, so war der Ton der

---

wieder mit hinabgerollt. Unzählige Stösse von unregelmässiger Stärke und Aufeinanderfolge entstehen auf diese Weise. Die Vereinigung derselben macht auf uns den Eindruck eines Schreies. Daher die Zeile in Tennyson's Maud:

„*Now to the scream of a maddened beach*
dragged down by the wave."

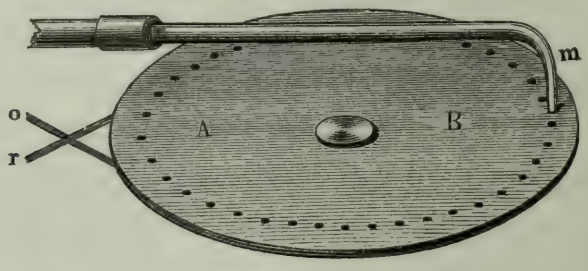
Die Höhe des Tones hängt bis zu einem gewissen Grade von der Grösse der Kiesel ab; sie verändert sich vom Gebrüll, wenn die Steine gross sind, bis zum Schrei; vom Schrei zu einem Geräusch wie von bratendem Speck, und wenn die Kiesel so klein sind, dass sie wie Grand werden, wird der Ton zum Zischen. Das Gebrüll der sich brechenden Wellen selbst ist indess hauptsächlich dem Platzen von Luftblasen zuzuschreiben.

[1]) Wärme als Art der Bewegung.

einer reinen, aber harten Männerstimme. Nun wurde der Hahn in der Weise abgeändert, dass er das Loch nie völlig schloss, sondern etwa $^1/_3$ desselben offen blieb. Wurde jetzt das Oeffnen 720 Mal in der Secunde wiederholt, so war der Ton ungewöhnlich weich und sanft. Bei 360 Unterbrechungen war der Ton weicher, als der irgend einer Männerstimme von derselben Tonhöhe.

Die Schwierigkeit aber, die nöthige Geschwindigkeit zu erhalten, macht eine andere Form des Versuches für unseren jetzigen Zweck geeigneter. Hier ist eine Scheibe von Papier AB (Fig. 18) von 0,3 m Durchmesser, die

Fig. 18.

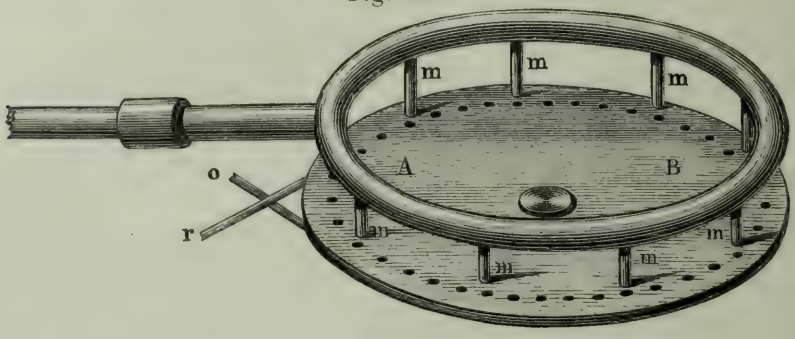


nahe am Rande in gleichen Abständen in einem Kreise von Löchern durchbohrt ist. Die Scheibe ist durch eine Unterlage von Zinn verstärkt und kann durch eine Centrifugalmaschine in schnelle Rotation versetzt werden. Während ihrer Rotation verschwinden die einzelnen Löcher, indem sie zu einem continuirlichen dunkleren Kreis zusammenfliessen. Unmittelbar über diesem Kreise ist eine Glasröhre m angebracht, die mit einem Blasebalg verbunden ist. Die Scheibe bewegt sich jetzt nicht, und das untere Ende der Glasröhre befindet sich unmittelbar über einem Loch. Tritt man daher den Blasebalg, so geht der Wind von m durch das unterhalb befindliche Loch. Dreht man aber die Scheibe ein wenig, so kommt ein undurchbohrter Theil derselben

unter die Röhre, und der Luftstrom wird unterbrochen. Wenn ich die Scheibe langsam drehe, so bringe ich nach einander die einzelnen Löcher unter die Röhre, und jedesmal geht dann ein Luftstoss hindurch. Die Rotation ist jetzt rasch, und die Stösse folgen einander sehr schnell, so dass sie Schwingungen in der Luft erzeugen, die sich zu einem continuirlichen musikalischen Ton vereinen, den Sie Alle vernehmen. Beachten Sie, wie der Ton wechselt. Wird die Centrifugalmaschine schnell gedreht, so ist der Ton hoch; verzögert man ihre Bewegung, so sinkt die Höhe augenblicklich. Hätte ich statt eines Glasrohres deren zwei angebracht, die eben so weit von einander entfernt wären, wie zwei von unseren Löchern, so dass, wenn die eine Röhre über dem einen Loche sich befindet, die andere über dem nächsten stehen würde, so ist es klar, dass wir beim Blasen durch beide Röhren beim Drehen der Scheibe einen Impuls durch beide Löcher zu gleicher Zeit erhalten werden. Die Stärke des Schalls würde dadurch vermehrt werden, aber die Höhe würde unverändert bleiben. Die beiden, zu gleicher Zeit heraustretenden Impulse würden vereint eine grössere Wirkung als ein einzelner auf unser Ohr ausüben. Und benutzen wir statt zweier Löcher gleichzeitig zehn, oder noch besser, hätten wir für jedes Loch in der Scheibe eine Röhre, so würden alle Impulse der ganzen Reihe gleichzeitig heraustreten und alle gleichzeitig abgeschnitten werden. Diese Impulse würden einen bei weitem stärkeren Ton erzeugen, als der, den wir bei dem abwechselnd unterbrochenen Austritt der Luft aus einer einzigen Röhre erhielten. Bei der jetzt vor Ihnen stehenden Einrichtung (Fig. 19, a. f. S.) sind neun Röhren angebracht, durch welche Luft geblasen wird; durch neun Oeffnungen entweichen die Im-

pulse also auf einmal. Drehen wir die Centrifugalmaschine bald schneller, bald langsamer, so steigt und

Fig. 19.



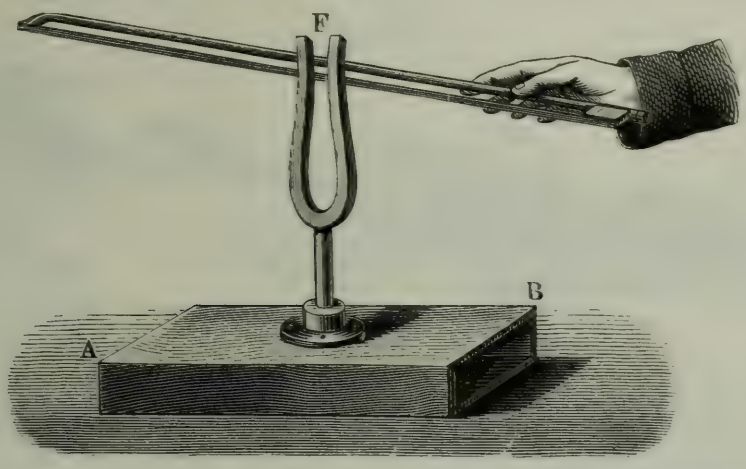
sinkt der Ton wie das laute Klagen des wechselnden Windes.

§. 4. Musikalische Töne durch eine Stimmgabel erzeugt.

Wir können noch verschiedene andere Mittel anwenden, um die Luft in periodische Bewegungen zu versetzen. Wird eine gespannte Saite seitwärts gezogen und schnell wieder losgelassen, so ertheilt sie der Luft Schwingungen, die einander in vollkommen regelmässigen Intervallen folgen. Eine Stimmgabel thut dasselbe. Ich streiche mit einem Bogen über die Zinken dieser Stimmgabel (Fig. 20). Der Bogen ist mit Harz bestrichen, vermöge dessen die Rosshaare an der Gabel haften. Der Widerstand der Zinke wird aber bald zu heftig, und sie schwingt plötzlich zurück; der Bogen erfasst sie zwar augenblicklich wieder, doch schwingt sie sogleich wieder zurück, sobald ihr Widerstand gross genug wird. Dieser rhythmische Process, der sich unaufhörlich während des Streichens mit dem Bogen wiederholt, versetzt die Gabel zuletzt in lebhafte Schwingungen und erzeugt so einen musikalischen Ton. Ständen

Sie nahe bei der Gabel, so könnten Sie dieselbe schwingen sehen; eine taube Person, die ihre Hand genügend nahe an sie hielte, würde die Erschütterungen der Luft fühlen. Oder die schwingende Gabel berührt eine Karte,

Fig. 20.



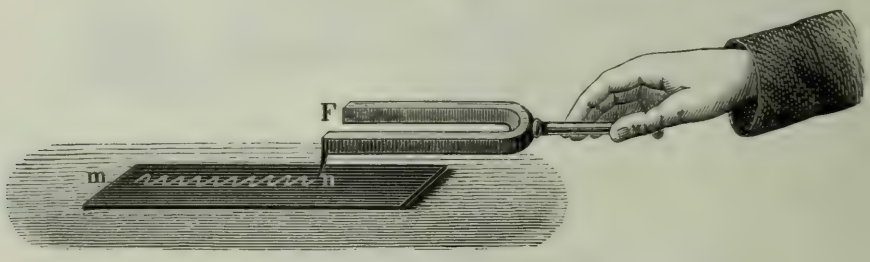
die Schläge gegen die Karte verbinden sich, wie bei dem Gyroskop, zu einem musikalischen Ton, und die Gabel kommt schnell in Ruhe. Das, was wir Stillschweigen nennen, drückt nur diese Abwesenheit der Bewegung aus.

Errege ich zuerst die Stimmgabel, so geht der Schall von ihr mit seiner Maximalstärke aus und wird allmählich schwächer, während die Gabel zu schwingen fortfährt. In unmittelbarer Nähe kann man beobachten, dass die Amplitude oder der Raum, durch den die Zinken schwingen, allmählich kleiner und kleiner wird. Doch kann auch das geübteste Ohr unter Ihnen keine Veränderung in der Höhe des Tones entdecken. Das Sinken der Stärke eines Tones zieht darum nicht das Sinken seiner Höhe nach sich. Obgleich sich die Amplitude ändert, bleibt doch die Zahl der Schwingungen dieselbe. Höhe und Stärke müssen daher streng von einander ge-

trennt werden; die letztere hängt nur von der Amplitude, die erstere nur von der Zahl der Schwingungen ab.

Man kann eine Stimmgabel den Gang ihrer eigenen Bewegung aufschreiben lassen. An die eine ihrer Zinken (Fig. 21) ist ein in einer Spitze endigender Streifen von

Fig. 21.



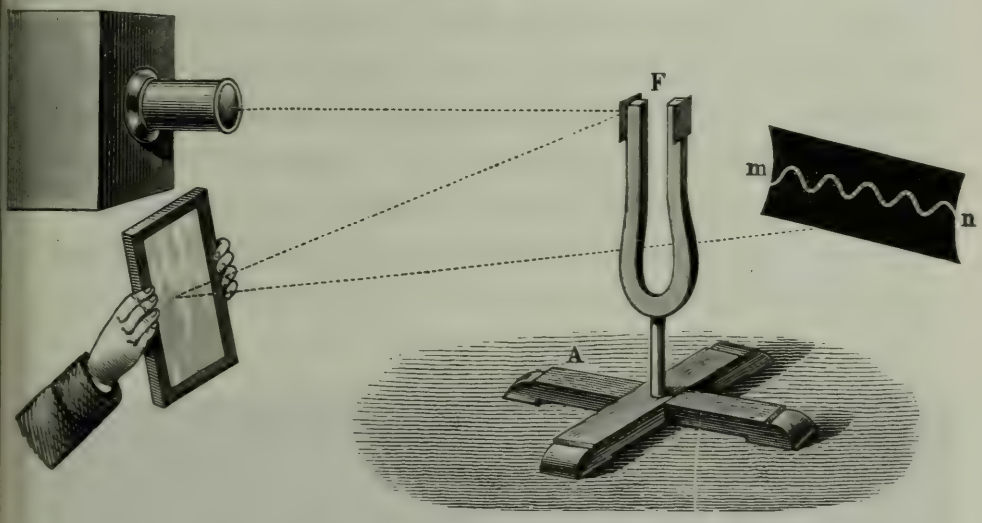
dünnem Kupferblech befestigt. Die Stimmgabel wird in Schwingungen versetzt, und mit ihr schwingt der Metallstreifen. Jetzt senke ich langsam seine Spitze auf ein Stück berusstes Glas. Sie bewegt sich langsam über die berusste Oberfläche hin und her und verzeichnet eine scharfe Linie. So lange meine Hand in Ruhe bleibt, fährt die Spitze immer wieder auf derselben Linie entlang. Aber es ist klar, dass ich nur die Stimmgabel über die Glasplatte hinzuziehen brauche. um eine Schlangenlinie zu erhalten m,n, (Fig. 21).

Bei Wiederholung des Versuches, ohne dass die Stimmgabel von Neuem angeschlagen wird, nimmt, wie Sie sehen, die Tiefe der Einbiegungen ab. Die gewundene Linie nähert sich mehr und mehr einer Geraden. Dies ist der sichtbare Beweis für die Abnahme der Amplituden. Wenn die Einbiegungen völlig verschwinden, so ist die Amplitude Null, und der von derselben abhängige Ton verschwindet völlig.

Herrn Lissajous verdanken wir eine sehr schöne Methode zur sichtbaren Darstellung der Schwingungen

einer Stimmgabel. An der einen Zinke der grossen Stimmgabel *F* (Fig. 22) ist ein kleiner Metallspiegel befestigt; die andere Zinke ist mit einem Metallstück beschwert, um das Gleichgewicht herzustellen. Wir lassen einen dünnen Strahl von hellem Licht auf den Spiegel fallen. Der Strahl wird von demselben reflectirt.

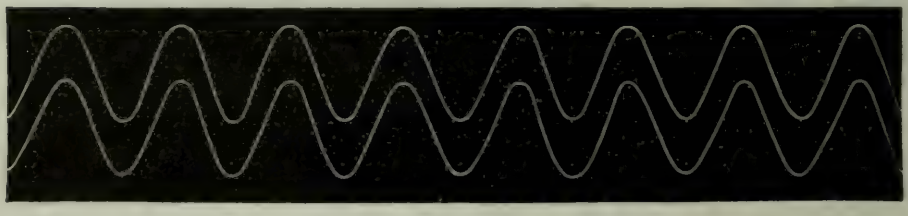
Fig. 22.



Ich fange ihn durch einen kleinen Handspiegel auf, welcher ihn wiederum auf den Schirm *mn* als einen kleinen leuchtenden Kreis auf der weissen Oberfläche zurückwirft. Der Kreis ist vollkommen bewegungslos. Sobald aber die Stimmgabel in Schwingungen versetzt wird, bewegt sich der reflectirte Strahl schnell auf und nieder und bildet einen 60 bis 90 cm langen Streifen. Seine Länge hängt von der Weite der Schwingungen ab; bei dem allmählichen Aufhören der Bewegung der Stimmgabel wird er kürzer und kürzer. Er erscheint indess so lange als eine gerade Linie, als der Spiegel in einer festen Lage erhalten wird. Aber jetzt drehe ich denselben plötzlich so, dass der Strahl von links nach rechts über den Schirm hingleitet; augenblicklich

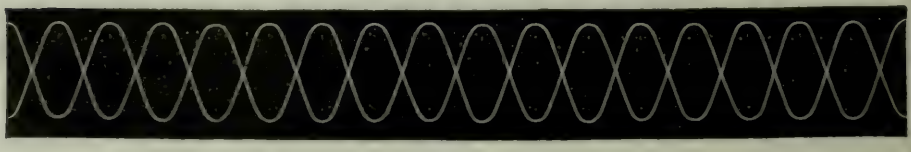
geht die gerade Linie in eine schöne leuchtende Wellenlinie *mn* über. Ein Lichteindruck, der eine Stelle der Retina getroffen, verweilt daselbst $^1/_{10}$ Secunde. Wenn daher die Zeit, in der das verlängerte Bild von der einen Seite des Schirmes zur anderen geführt wird, kürzer ist, als $^1/_{10}$ Secunde, so bedeckt für einen Augenblick die leuchtende Wellenlinie die ganze Breite des Schirmes. Wir lassen jetzt das Licht der Lampe, statt durch eine, durch zwei, etwa $^1/_2$ Zoll von einander entfernte Oeffnungen austreten und projiciren so über einander zwei Lichtkreise auf den Schirm. Schlagen wir die Stimmgabel an und drehen den Spiegel, so erhalten wir diese glänzende doppelte Wellenlinie auf der dunklen Oberfläche (Fig. 23). Ich drehe jetzt den

Fig. 23.



Schirm so, dass die beiden Kreise neben einander erscheinen. Wird die Stimmgabel nun in Schwingungen versetzt und der Spiegel in Bewegung gesetzt, so erhalten

Fig. 24.

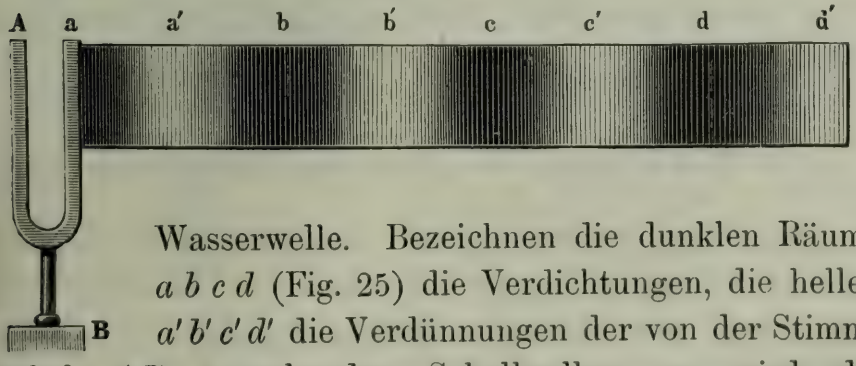


wir diese schöne, aus zwei durch einander geschlungenen Wellenlinien gebildete Figur (Fig. 24).

§. 5. Die Schallwellen.

Wie sollen wir uns den Zustand der Luft vorstellen, durch welche der musikalische Ton hindurch geht? Denken Sie sich, dass die eine Zinke der Stimmgabel schnell vorwärts schwingt; sie verdichtet die Luft dicht vor sich und lässt bei dem Rückgang ein partielles Vacuum hinter sich, und dieser Process wiederholt sich bei jeder folgenden Vor- und Rückschwingung. Die ganze Thätigkeit der Stimmgabel besteht darin, die Luft in solche Verdichtungen und Verdünnungen zu zerlegen, die sich nach ihrer Bildung der Reihe nach durch die Luft fortpflanzen. Eine Verdichtung mit der darauf folgenden Verdünnung bildet, wie wir schon wissen, eine Schallwelle. Im Wasser wird die Länge der Wellen vom Gipfel einer Welle zu dem der anderen gemessen; beim Schall entspricht in gleicher Weise die Wellenlänge dem Abstande zwischen zwei auf einander folgenden Verdichtungen. Die Verdichtung in einer Schallwelle entspricht dem Berge, die Verdünnung dem Thale einer

Fig. 25.



Wasserwelle. Bezeichnen die dunklen Räume *a b c d* (Fig. 25) die Verdichtungen, die hellen *a′ b′ c′ d′* die Verdünnungen der von der Stimmgabel *AB* ausgehenden Schallwellen, so wird die Wellenlänge durch die Länge *ab* oder *bc* oder *cd* gemessen.

§. 6. Erklärung der Tonhöhe: Bestimmung der Schwingungszahlen.

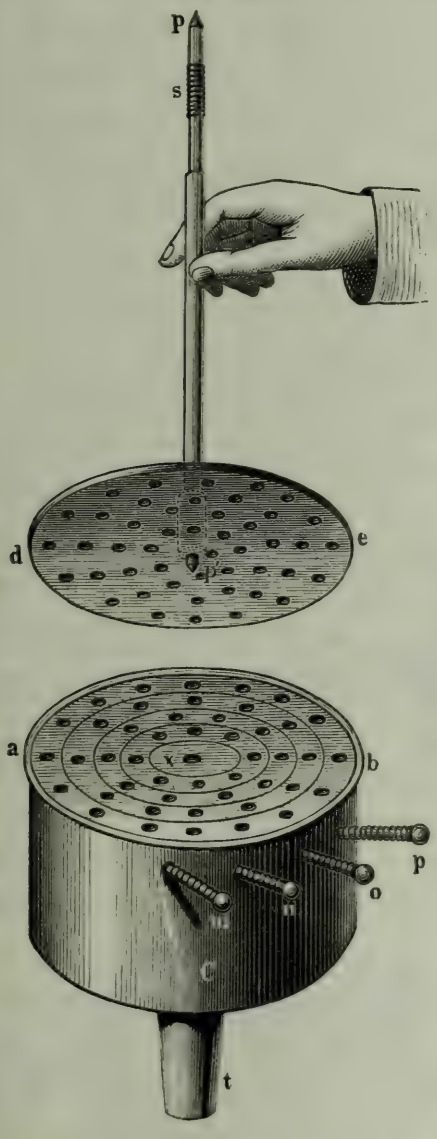
Haben zwei Töne von verschiedenen Quellen dieselbe Höhe, so ist ihre Schwingungsdauer dieselbe. Giebt z. B. eine Saite denselben Ton wie eine Stimmgabel, so ist der Grund der, dass beide mit derselben Geschwindigkeit schwingen, und wenn eine Stimmgabel denselben Ton giebt, wie eine Orgelpfeife oder eine Physharmonica, so ist wiederum der Grund der, dass die Schwingungen des Stahls der ersteren in genau derselben Zeit erfolgen, wie die Schwingungen der Luftsäule in der zweiten und die der Zunge in der dritten. Dasselbe gilt von der menschlichen Stimme. Wenn eine Saite und die Stimme denselben Ton geben, so schwingen die Stimmbänder des Sängers eben so schnell wie die Saite. Haben wir ein Mittel, die Zahl der Schwingungen zu bestimmen, die einem musikalischen Ton entsprechen? Können wir aus der Tonhöhe einer Saite, einer Orgelpfeife, einer Stimmgabel oder der menschlichen Stimme die Zahl der Wellen ableiten, die sie in einer Secunde aussenden? Diese schwierige Frage kann auf das Vollkommenste gelöst werden.

§. 7. Die Sirene: Analyse des Instruments.

Ich habe Ihnen bei der Drehung einer durchlöcherten Pappscheibe gezeigt, dass ein musikalischer Ton durch eine schnelle Aufeinanderfolge von Luftimpulsen erzeugt wird. Könnten wir auf irgend eine Weise die Zahl der Umdrehungen verzeichnen, die jene Scheibe in einer Minute macht, so könnten wir dadurch

die Zahl der Luftimpulse bestimmen, die in einer Minute einem Ton von bestimmter Höhe zukommen. Die Pappscheibe ist indess nur ein billiger Ersatz für einen viel vollkommeneren Apparat, der keine Centrifugalmaschine erfordert und seine eigenen Umdrehungen mit der grössten Genauigkeit verzeichnet.

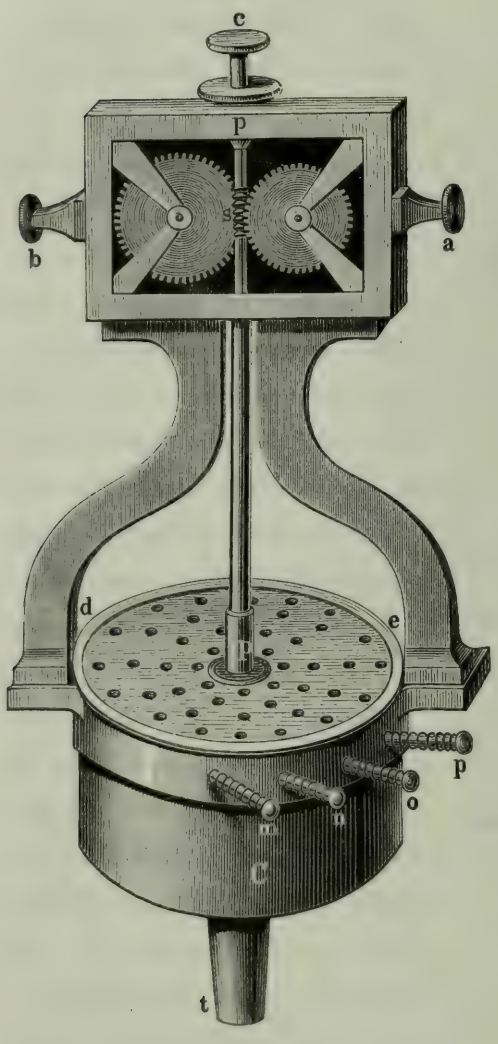
Fig. 26.



Ich will das Instrument aus einander nehmen, so dass Sie seine einzelnen Theile sehen können. Ein Messingrohr *t* (Fig. 26) führt in diesen Messingcylinder *C*, der oben durch die Messingplatte *ab* geschlossen ist. Die Platte ist von vier concentrischen Reihen von Löchern durchbohrt. Die innerste Reihe enthält 8, die zweite 10, die dritte 12 und die äusserste 16 Oeffnungen. Blase ich in das Rohr *t*, so entweicht die Luft durch die Oeffnungen, und wir haben nun die Aufgabe, diese continuirlichen Luftströme in unterbrochene Luftstösse zu verwandeln. Dazu dient eine Messingscheibe *de*, die ebenfalls in vier Reihen mit 8, 10, 12 und 16 Löchern durchbohrt ist, so dass diese Lochreihen vom Mittelpunkte in gleichem Abstande sich

befinden, wie die Reihen der Scheibe *ab*. Durch den Mittelpunkt der Scheibe *de* geht eine Stahlaxe, deren Enden *p* und *p'* fein zugespitzt sind. Diese durchbohrte Scheibe soll nun über dem durchbohrten Deckel *ab* des Cylinders *C* rotiren. Sie werden verstehen, wie sich dieses ergiebt, wenn Sie sehen, wie das Instrument zusammengesetzt wird.

Fig. 27.



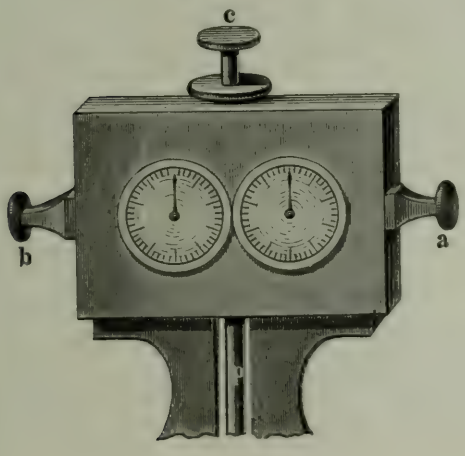
In dem Centrum von *ab* befindet sich ein vertieftes, wohl polirtes Stahllager *x*, in welches wir das untere Ende *p* der Axe *pp'* einsetzen. Ueber das obere Ende derselben schrauben wir eine innen gut polirte Stahlhülse *c* (Fig. 27), so dass die Axe oben und unten gehalten wird, aber mit so geringem Druck, dass sie in den fein polirten Stahllagern sich mit äusserst geringer Reibung drehen kann. In Fig. 27 bedeckt die Scheibe *de* den Deckel des Cylinders *C*. Ich bitte Sie, vorläufig das Uhrwerk des Apparates ausser Acht zu lassen. Drehen wir die Scheibe *de* langsam herum, so können wir es so einrichten, dass ihre Durchbohrungen mit denen

des darunter liegenden Cylinders entweder zusammentreffen oder nicht zusammentreffen.

Sobald die Scheibe sich dreht, gelangen abwechselnd ihre Oeffnungen über die Durchbohrungen des Cylinders oder über die Zwischenräume zwischen denselben. Wird also Luft in *C* eingeführt, und zugleich die Scheibe in Rotation gesetzt, so hätten wir unsern Zweck erreicht und den Luftstrom in einzelne Impulse zerlegt. Bei diesem ausgezeichneten Instrument dreht sich nun die Scheibe durch die Luft selbst, deren Strom sie unterbrechen soll. Dazu sind einfach die Löcher in dem Deckel des Cylinders *C* schräg gebohrt, und ebenso, aber mit entgegengesetzter Neigung auch die Löcher in der Scheibe *de*. Die Luft muss deshalb aus dem Cylinder *C* in seitlich gerichteten Strömen austreten, die gegen die Scheibe *de* stossen und sie in Rotation versetzen. So wird durch den Durchgang durch die Sirene die Luft zu Schallwellen geformt.

Wenige Worte werden genügen, um Sie auch mit dem Zählapparat des Instrumentes bekannt zu machen. Oben an der Stahlaxe *pp'* sehen Sie die Schraube *s*, die in ein System von zwei Zahnrädern eingreift, welche Sie auf der Rückseite des Instrumentes erkennen können.

Fig. 28.



Dreht sich die Scheibe *de* und ihre Axe, so rotiren auch die Zahnräder. Auf der Vorderseite des Instrumentes sehen Sie zwei getheilte Kreise (Fig. 28), auf denen je ein, mit einem Zahnrad verbundener Zeiger sich befindet. Diese

Zeiger geben die Zahl der Umdrehungen der Scheibe *de* in irgend einer Zeit an. Drücke ich an den Knöpfen *a* oder *b*, so kann ich dadurch das Räderwerk mit der Schraube *s* in Verbindung bringen oder es davon entfernen, und so in jedem Augenblicke den Zählapparat in Thätigkeit setzen oder ausschalten. Endlich sehen Sie die vier Stifte *mnop*, durch die ich die vier Lochreihen in den Deckel des Cylinders *C* einzeln nach Belieben öffnen und schliessen kann. Drücke ich *m*, so öffne ich die eine Reihe, drücke ich *n*, eine andere. Drücke ich zwei oder drei Stifte, so öffne ich zwei oder drei Lochreihen, drücke ich alle vier Stifte, so treten Luftimpulse aus allen vier Lochreihen gleichzeitig aus. Das fertige Instrument steht jetzt vor Ihnen und Sie kennen es genau.

Das Instrument erhielt den Namen Sirene von seinem Erfinder Cagniard de la Tour. Der von uns benutzte Apparat ist die von Dove bedeutend verbesserte Sirene. Die Pappscheibensirene, mit der wir schon früher experimentirt haben, wurde von Seebeck angegeben, der an derselben verschiedene interessante Abänderungen vornahm und damit wichtige Versuche anstellte. Wir wollen jetzt die Sirene singen lassen. Wenn der Stift *m* gedrückt wird, so öffnet sich dadurch die äusserste Lochreihe des Cylinders *C*. Setzen wir den Blasebalg in Thätigkeit, so stösst die Luft gegen die Scheibe *de*, welche jetzt zu rotiren beginnt. Sie hören eine Reihe von Impulsen, die so langsam auf einander folgen, dass Sie sie zählen können. So wie aber die Bewegung schneller wird, folgen auch die Impulse einander schneller, und jetzt hören Sie zuerst einen tiefen musikalischen Ton. Nimmt die Umdrehungsgeschwindigkeit zu, so steigt die Höhe des Tones; er ist jetzt klar und

voll, und presse ich die Luft stärker, so wird er so hoch, dass er das Ohr schmerzlich berührt. Hier haben wir einen neuen Beweis für die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Zahl der Schwingungen. Drücke ich gegen den Rand der Scheibe *de* und vermindere dadurch ihre Zahl, so wird der Ton sogleich tiefer. Bei andauerndem Druck wird der Ton immer tiefer und endet zuletzt in den discontinuirlichen Impulsen, mit denen er begonnen hatte.

Wäre das Gebläse hinlänglich stark und die Sirene möglichst frei von Reibungshindernissen, so könnten wir ihre Töne mehr und mehr in die Höhe treiben, bis sie endlich nicht mehr gehört werden könnten. Indess würde dies kein Beweis für die Abwesenheit einer Schwingungsbewegung in der Luft sein, sondern vielmehr zeigen, dass unser Gehörorgan unfähig ist, Schwingungen aufzunehmen, und als Schall wahrzunehmen, deren Zahl eine gewisse Grenze überschreitet. In dieser Beziehung ist das Ohr, wie wir sogleich erfahren werden, dem Auge ganz ähnlich.

Mit Hülfe der Sirene können wir mit grösster Genauigkeit die Schwingungszahl eines tönenden Körpers bestimmen, sei es einer schwingenden Saite, einer Orgelpfeife, einer Flöte oder der menschlichen Stimme. Arbeiten wir genau, so können wir sogar aus dem Summen eines Insects die Zahl seiner Flügelschläge in der Secunde bestimmen. Ich will Ihnen die Methode klar zu machen versuchen, indem ich in Ihrer Gegenwart die Zahl der Schwingungen dieser Stimmgabel bestimme. Durch den Blasebalg presse ich Luft in die Sirene und ziehe zu gleicher Zeit den Bogen über die Gabel. Beide tönen jetzt zusammen, die Stimmgabel giebt den höheren Ton an. Aber die Tonhöhe der Sirene steigt allmählich,

und jetzt hören Sie die, den Musikern so wohl bekannten „Stösse“, welche anzeigen, dass die Höhe der beiden Töne nicht sehr von einander verschieden ist. Diese Stösse werden immer langsamer; jetzt hören sie völlig auf, und beide Töne zerfliessen gewissermaassen in einen Klang.

Bis jetzt war das Uhrwerk der Sirene ausser Thätigkeit; ich setze es in Bewegung, indem ich auf den Knopf *a* drücke, sobald der Secundenzeiger meiner Uhr auf der Zahl 60 steht. Wir lassen die Scheibe ihre Rotation eine Minute lang fortsetzen, wobei die Stimmgabel von Zeit zu Zeit angestrichen wird, um uns von dem fortdauernden Einklange zu überzeugen. Der Secundenzeiger meiner Uhr nähert sich jetzt der Zahl 60; so wie er über dieselbe hinweggeht, drücke ich plötzlich auf den Knopf *b* und halte das Uhrwerk an, und jetzt lesen wir die Zahl der Umdrehungen der Scheibe an den Zeigern ab. Sie ist 1440.

Aber in der geöffneten Reihe befanden sich während des Experimentes 16 Löcher; bei jeder Umdrehung erhielten wir also 16 Luftstösse oder 16 Schallwellen. Durch Multiplication von 1440 mit 16 erhalten wir 23040 als die Zahl der Schwingungen der Stimmgabel in einer Minute; durch Division dieser Zahl durch 60 finden wir die Zahl ihrer Schwingungen in einer Secunde gleich 384.

§. 8. Bestimmung der Wellenlängen: Schwingungsdauer.

Haben wir die Zahl der Schwingungen bestimmt, so können wir die Länge der entsprechenden Schallwellen sehr leicht finden. Die Stimmgabel schwinge in freier Luft; eine Secunde nach Beginn ihrer Schwingungen

würde die zuerst erregte Schallwelle in Luft von 0° C. eine Entfernung von 332,3 m erreicht haben. In der Luft dieses Saales, dessen Temperatur etwa 15° C. ist, würde sie einen Weg von 338,6 m zurückgelegt haben. Auf diesem Wege sind also 384 Schallwellen ausgebreitet; dividiren wir also 338,6 durch 384, so finden wir die Länge jeder Welle nahezu gleich 0,9 m. Werden in gleicher Weise die Schwingungszahlen der vier vor Ihnen stehenden Stimmgabeln bestimmt, so ergeben sie sich gleich 256, 320, 384 und 512. Diese Zahlen entsprechen Wellenlängen von 1,3 m, 1,07 m, 0,89 m und 0,65 m. Die durch die Stimmorgane eines Mannes erzeugten Wellen haben bei dem gewöhnlichen Gespräch eine Länge von 2,4 bis 3,7 m, die einer Frau eine Länge von 0,6 bis 1,2 m, daher ist die weibliche Stimme in den tieferen Tönen des Gespräches mehr als eine Octave höher als die des Mannes, in den höheren Tönen sogar zwei Octaven.

Es ist wohl zu beachten, dass wir unter der Bezeichnung „Schwingungen“ stets ganze Schwingungen verstehen, also wenn wir von einer Schallwelle sprechen, wir die Verdichtung und die dazu gehörige Verdünnung zusammen nehmen. Eine Schwingung begreift für uns einen Hin- und einen Hergang des schwingenden Körpers; jede durch solche Schwingung erzeugte Welle biegt das Trommelfell einmal nach innen und sodann nach aussen. Es sind dies die in England und Deutschland üblichen Definitionen einer Schwingung und einer Schallwelle. In Frankreich dagegen besteht eine Schwingung nur aus einem Hin- oder aus einem Hergange des schwingenden Körpers nach einer Richtung. Die französischen Schwingungen sind also nur die Hälfte der unserigen; wir wollen sie deshalb Halbschwingungen nennen. Ueberall, wo wir in diesen Vorlesungen das

Wort Schwingung ohne Weiteres brauchen, bezieht es sich auf ganze Schwingungen.

Während der Zeit, in der eine solche Schallwelle völlig über ein Lufttheilchen hinübergeht, macht dieses Theilchen eine ganze Schwingung. Im ersten Augenblick wird es vorwärts getrieben zu einer Verdichtung, im zweiten geht es zurück zu einer Verdünnung. Die Zeit also, in der ein Theilchen eine ganze Schwingung vollführt, ist dieselbe, in der sich die Schallwelle durch einen, ihrer eigenen Länge gleichen Weg fortpflanzt. Es sei z. B. die Länge der Welle 2,4 m und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft von unserer augenblicklichen Zimmertemperatur 338,6 m in der Secunde; dann durchläuft die fragliche Welle einen, ihrer Länge gleichen Weg in der Luft in $^1/_{140}$ Secunde, diese Zeit verlangt jedes Lufttheilchen, durch das sie geht, um eine Schwingung zu vollenden.

In Luft von gegebener Dichtigkeit und Elasticität entspricht eine bestimmte Wellenlänge immer derselben Tonhöhe. Würde aber die Dichtigkeit oder Elasticität nicht überall die gleiche sein, gingen z. B. die Schallwellen von einer unserer Stimmgabeln aus kalter in warme Luft über, so würde sogleich eine Vergrösserung der Wellenlänge eintreten, ohne dass die Tonhöhe sich änderte, denn die Zahl der Wellen, die unser Ohr erreichten, würde sich nicht ändern. Umgekehrt würde bei gleicher Wellenlänge die Höhe des Tones höher sein in heisser, als in kalter Luft, denn die Wellen würden schneller auf einander folgen. In einer Atmosphäre von Wasserstoff würden Wellen von einer gewissen Länge einen etwa zwei Octaven höheren Ton erzeugen, als Wellen von derselben Länge in der Luft, denn in Folge der grösseren Fortpflanzungsgeschwindigkeit würde

die Zahl der in einer bestimmten Zeit zu uns gelangenden Anstösse in dem ersten Falle etwa vier Mal so gross sein als in dem letzteren.

§. 9. Erklärung einer Octave.

Ich öffne jetzt gleichzeitig die innerste und äusserste Lochreihe unserer Sirene; mögen sie nun gleichzeitig oder nach einander tönen, die mit musikalischem Gehör Begabten empfinden sofort die Verwandtschaft zwischen beiden Tönen. Sie bemerken sogleich, dass der von dem Kreise mit 16 Löchern ausgehende Ton die Octave von dem ist, der von dem Kreise mit acht Löchern ausgeht. Aber für jede Welle, die der letztere aussendet, werden von dem ersteren zwei Wellen ausgesendet. So beweisen wir, dass der Begriff „Octave“ in physikalischer Beziehung einen Ton bezeichnet, der durch doppelt so viel Schwingungen hervorgerufen wird, wie sein Grundton. Multipliciren wir die Schwingungen der Octave mit 2, so erhalten wir die nächsthöhere Octave, und durch eine fortgesetzte Multiplication dieser Art erhalten wir eine Reihe von Zahlen, die einer Reihe von Octaven entsprechen. Gehen wir z. B. von einem Grundton von 100 Schwingungen aus, so finden wir durch diese fortgesetzte Multiplication, dass ein fünf Octaven höherer Ton durch 3200 Schwingungen erzeugt wird, nämlich:

100	Grundton	800	
2		2	
200	erste Octave	1600	vierte Octave
2		2	
400	zweite Octave	3200	fünfte Octave.
2			
800	dritte Octave		

Dieselbe Zahl erhält man bequemer durch Multiplication der Schwingungszahl des Grundtones mit der fünften Potenz von 2. In einer späteren Vorlesung wollen wir auf die Frage von den Tonintervallen zurückkommen. Für meinen gegenwärtigen Zweck bedarf ich nur der Definition einer Octave.

§. 10. Grenzen des menschlichen Gehörs und der musikalischen Töne.

Der Umfang des Gehörs ist nach beiden Richtungen begrenzt. Savart bestimmte die untere Grenze zu acht ganzen Schwingungen in der Secunde; um diese langsam wiederkehrenden Schwingungen zu einem Ton zu vereinen, musste er sehr kräftige Erschütterungen anwenden. Mittelst eines Zahnrades und eines dazu gehörigen Zählerwerkes bestimmte er die obere Grenze des Gehörs zu 24000 Schwingungen in der Secunde. Helmholtz hat neuerdings die untere Grenze auf 16, die obere auf 38000 Schwingungen in der Secunde festgestellt. Mit Hülfe sehr kleiner Stimmgabeln zeigte der verstorbene Despretz, dass ein Ton, der 38000 Schwingungen in der Secunde entspricht, noch hörbar ist [1]). Gehen wir von dem Ton 16 aus und multipliciren beständig mit 2, oder kürzer, erheben wir 2 auf die elfte Potenz und multipliciren diese mit 16, so finden wir, dass die Schwingungszahl 32768 elf Octaven über dem Grundton liegt. Nehmen wir also die von Helmholtz angegebenen Grenzen an, so umfasst die ganze Ausdehnung des menschlichen Gehörs ungefähr 11 Octaven. Aber

[1]) Der Irrthum von Savart besteht nach Helmholtz darin, dass er eine Anordnung getroffen hatte, in der Obertöne (vergl. die dritte Vorlesung) fälschlich für den Grundton angesehen wurden.

nicht alle zwischen diesen Grenzen liegenden Töne können in der Musik verwendet werden. Die Schwingungszahl der gewöhnlichen musikalischen Töne liegt zwischen 40 und 4000 Schwingungen in der Secunde, sie machen also in runder Zahl sieben Octaven aus [1]).

Die Grenzen des Gehörs sind bei verschiedenen Personen verschieden. Wollaston, der dies zuerst beobachtete, als er die Höhe verschiedener sehr hoher Töne bestimmen wollte, bemerkte an einem Freunde eine vollkommene Unempfindlichkeit für den Ton einer kleinen Orgelpfeife, deren Schärfe noch weit innerhalb der gewöhnlichen Grenzen seines Gehörs lag. Der Gehörsinn dieser Person endete bei einem Ton, der vier Octaven höher lag, als das mittlere *E* des Claviers. Das Quieken der Fledermaus, das Zirpen der Grille, selbst das Gezwitscher des gewöhnlichen Sperlings werden von einigen Menschen nicht gehört, die doch für tiefere Töne ein feines Ohr besitzen. Der Unterschied um einen Ton genügt zuweilen, um den Uebergang vom Hören zum Nichthören hervorzurufen. „Die Plötzlichkeit des Ueber-

---

[1]) „Der tiefste Ton der Instrumente des Orchesters ist das *E* des Conterbass mit $41^1/_4$ Schwingungen. Die neueren Pianos und Orgeln gehen gewöhnlich bis C^I mit 33 Schwingungen; grosse neue Flügel können A^{II} mit $27^1/_2$ Schwingungen erreichen. Man hat in grossen Orgeln noch eine tiefere Octave eingeschaltet, die bis zu C^{II} mit $16^1/_2$ Schwingungen reicht. Aber alle Töne unterhalb *E* sind musikalisch unvollkommen, da sie der Grenze nahe sind, wo das Ohr die Schwingungen nicht mehr zu einem Ton vereinen kann. In der Höhe erreicht das Pianoforte a^{IV} mit 3520 Schwingungen oder bisweilen c^V mit 4224 Schwingungen. Der höchste Ton des Orchesters ist wahrscheinlich das d^V der Piccoloflöte mit 4752 Schwingungen.“ Helmholtz, Tonempfindungen S. 30. Bei dieser Aufzeichnung gehen wir vom *C* mit 66 Schwingungen aus und nennen die erste tiefere Octave C^I und die zweite C^{II}, die nächsthöhere Octave aber *c*, die folgende c^I, die dritte c^{II}, die vierte c^{III} u. s. f. In England ist, wie mir Herr Macfarren mittheilt, der tiefste Ton nicht *E*, sondern das eine viertel Octave höhere *A*.

gangs", schreibt Wollaston, „vom vollkommenen Hören zu einer totalen Abwesenheit der Wahrnehmung überrascht so sehr, dass es belustigend ist, einen derartigen Versuch mit einer Reihe kleiner Pfeifen in einem Kreise verschiedener Personen anzustellen. Es ist sehr eigenthümlich, die verschiedenen Mitglieder der Gesellschaft zu beobachten, wie sie nach einander den Wechsel ihrer Gefühle ausdrücken, wenn die Töne sich der Grenze ihres Gehörs nähern und über diese hinausgehen. Diejenigen, welche sich eines vorübergehenden Triumphes erfreuten, sind dann oft genöthigt, anzuerkennen, wie wenig weit sich ihre geringe Ueberlegenheit erstreckte." — „Nichts ist überraschender", schreibt Sir John Herschel, „als wenn von zwei Personen, welche beide nicht taub sind, die eine sich über die durchdringende Schärfe eines Tones beklagt, während die andere behauptet, dass gar kein Ton existire." So konnte eine Person, wie Wollaston anführt, gerade noch den Ton hören, der vier Octaven über dem mittleren *E* des Pianoforte liegt, während andere eine bestimmte Wahrnehmung von Tönen haben, die volle zwei Octaven höher sind. Das Gezwitscher des Sperlings bildet etwa die erstere Grenze, der Schrei der Fledermäuse liegt etwa eine Octave und das einiger Insecten wahrscheinlich noch eine Octave höher. In den „Glaciers of the Alps" habe ich ein von mir selbst beobachtetes Beispiel einer geringen Ausdehnung des Gehörs erwähnt. Als ich in Begleitung eines Freundes über die Wengernalp ging, waren die Wiesen auf beiden Seiten des Weges voll von Insecten, welche für mich die Luft mit ihrem lauten Gezirpe erfüllten. Mein Freund hörte nichts davon. Das Gesumme der Insecten lag jenseits der Grenze seines Gehörs [1]).

[1]) Vermöge kleiner Pfeifen, die er selbst erfunden hatte, ist die

§. 11. Die Paukenhöhle im Ohr. — Eustachi'sche Röhre.

Hinter dem Trommelfell befindet sich eine Höhlung — die Paukenhöhle —, die zum Theil von einer Reihe von Knochen, die in derselben an einander gereiht sind, zum Theil von Luft erfüllt ist. Diese Höhlung steht mit dem Munde vermittelst eines Ganges in Verbindung, der die Eustachi'sche Röhre genannt wird. Gewöhnlich ist diese Röhre geschlossen, so dass dadurch der Luftraum hinter dem Trommelfell von der äusseren Luft abgeschnitten ist. Wird unter diesen Umständen die äussere Luft dichter, so drückt sie das Trommelfell nach innen. Wird andererseits die äussere Luft dünner, während die Eustachi'sche Röhre geschlossen bleibt, so wird die Membrane nach aussen gedrückt. In beiden Fällen fühlt man Schmerz und man leidet unter partieller Taubheit. Als ich einmal den Stelviopass bei Nacht mit einem Freunde überschritt, klagte er über heftigen Schmerz in den Ohren. Als er seinen Speichel herunterschluckte, hörte der Schmerz augenblicklich auf. Durch das Schlucken wird die Eustachi'sche Röhre geöffnet und so das Gleichgewicht zwischen dem äusseren und inneren Druck hergestellt.

Man kann den Gehörsinn für schwache Töne vernichten, wenn man Nase und Mund verschliesst und die Brust ausdehnt wie beim Athmen. Diese Anstrengung entleert theilweise den Raum hinter dem Trommelfell, das dann durch den Druck der äusseren Luft in Span-

---

höhere Gehörgrenze kürzlich von Herrn Francis Gallon eingehend untersucht worden.

nung versetzt wird. Eine gleiche Taubheit für schwache Töne wird erzeugt, wenn Mund und Nase zugestopft sind, und man eine grosse Kraftanstrengung zum Athmen macht. In diesem Falle wird Luft durch die Eustachische Röhre in die Paukenhöhle gepresst, und das Trommelfell wird durch den Druck der inneren Luft ausgedehnt. Man kann den Versuch in einem Eisenbahnwagen machen, wo dann das leise Gerumpel verschwinden oder bedeutend geschwächt werden wird, während die schärferen Töne in unveränderter Stärke gehört werden. Dr. Wollaston konnte nach Belieben die Eustachi'sche Röhre schliessen und den Raum hinter dem Trommelfell mit verdichteter und verdünnter Luft füllen. Er konnte auf diese Art seine Taubheit beliebig lange erhalten, ohne dass es ihm beschwerlich wurde; nur musste er sie zuletzt durch Schlucken wieder aufheben. Eine plötzliche Erschütterung kann Taubheit erzeugen, indem sie Luft entweder in oder aus der Paukenhöhle presst. Ich sprang im Sommer 1858 von einer Klippe auf eine scheinbar tiefe Schneewehe, kam aber dabei in unangenehme Berührung mit einem Felsen, den der Schnee kaum bedeckte. Sogleich hörte das Sausen des Windes, das Rauschen der Gletscherströme und alle die anderen Geräusche auf, die man an einem sonnigen Tage in den Bergen vernimmt. Ich konnte kaum die Stimme meines Führers hören. Diese Taubheit dauerte eine halbe Stunde; dann öffnete das Schnauben der Nase die Eustachi'sche Röhre und erweckte mit magischer Geschwindigkeit alle die unzähligen Geräusche wieder, die die Luft um mich erfüllten.

Das Licht wird wie der Schall durch Impulse oder Wellen erzeugt, und Licht von verschiedenen Farben wird, wie Töne von verschiedener Höhe, durch verschie-

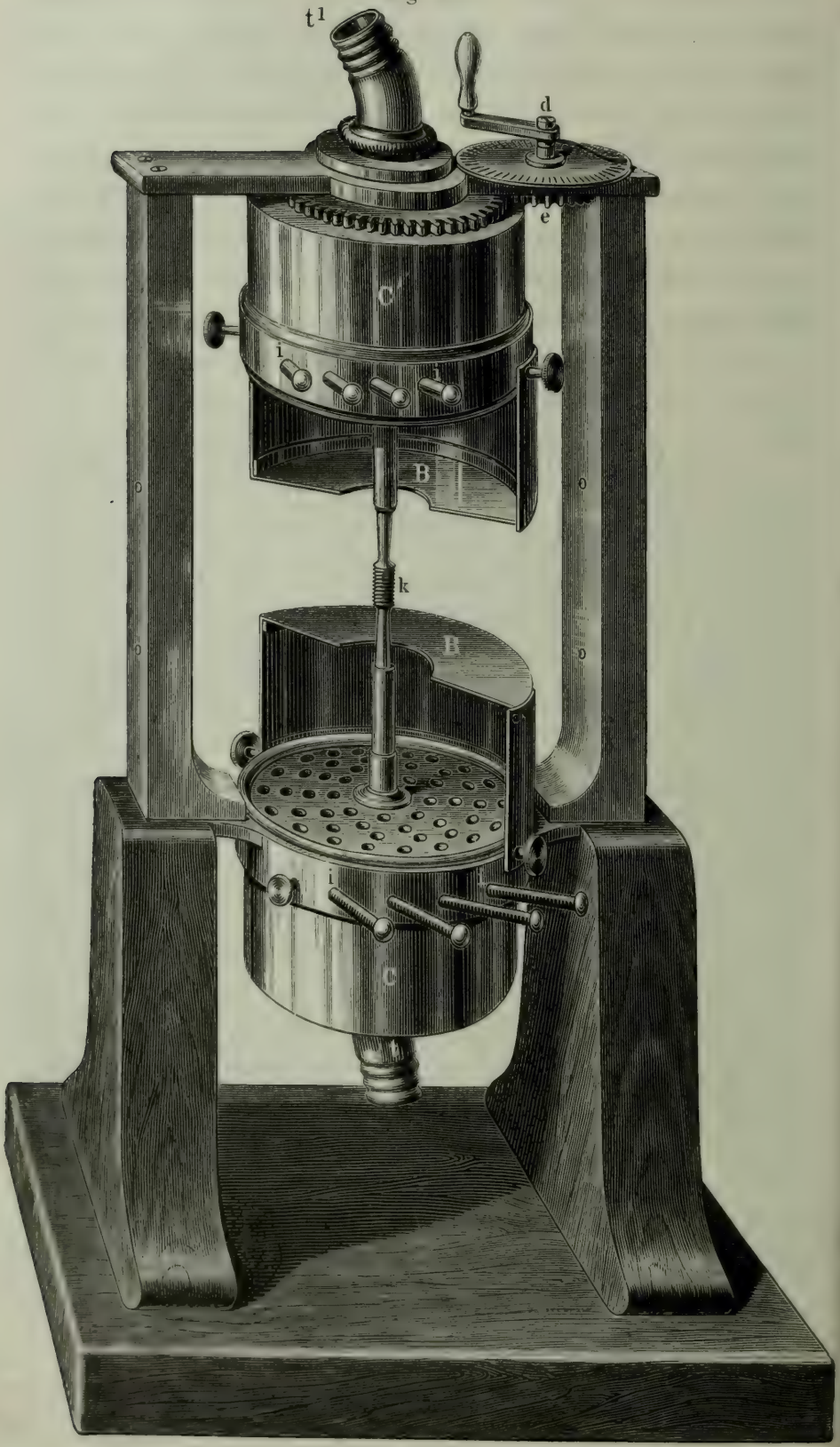
den schnelle Schwingungen erzeugt. Doch übertrifft das Ohr in der Weite der Wahrnehmung das Auge bedeutend; denn während das erstere elf Octaven beherrscht, umfasst das letztere kaum mehr als eine einzige. Die schnellsten Schwingungen, die das Auge als Licht treffen, haben nur ungefähr die doppelte Geschwindigkeit der langsamsten [1]), während die schnellsten Schwingungen, die das Ohr als musikalischer Ton treffen, mehr als 2000 Mal so schnell schwingen als die langsamsten.

§. 12. Helmholtz' Doppelsirene.

Dove vermehrte, wie wir gesehen haben, die Brauchbarkeit der Sirene von Cagniard de la Tour, indem er vier Reihen von Löchern statt einer anbrachte. Helmholtz hat die Anwendbarkeit des Instrumentes dadurch bedeutend vermehrt, dass er alle seine Theile verdoppelt hat. Die Doppelsirene, wie sie genannt wird, steht jetzt vor Ihnen (Fig. 29 a. f. S.). Sie besteht aus zwei Dove'schen Sirenen C und C', von denen die obere nach unten gekehrt ist. In der unteren Sirene erkennen Sie das Ihnen schon bekannte Instrument. Die Scheiben der Sirene haben dieselbe Axe, so dass, wenn die eine rotirt, auch die andere sich mit ihr dreht. Die Zahl der Umdrehungen wird wie früher durch ein Uhrwerk angezeigt (welches in der Figur fortgelassen ist). Wird Luft durch die Röhre t^1 gepresst, so tönt die obere Sirene allein; wird sie durch t gepresst, so tönt die untere allein; wird sie gleichzeitig durch t^1 und t gepresst, so tönen beide Sirenen. So können wir mit

[1]) Es ist kaum nöthig zu bemerken, dass die schnellsten Schwingungen und die kürzesten Wellen dem äussersten Violett entsprechen, während die langsamsten Schwingungen und längsten Wellen dem äussersten Roth des Spectrums entsprechen.

Fig. 29.



diesem Instrument weit mehr verschiedene Combinationen erhalten, als mit dem vorigen. Helmholtz hat auch eine Einrichtung angebracht, durch die er nicht nur die Scheibe der oberen Sirene, sondern auch den Cylinder C' über der Scheibe zum Rotiren bringen kann. Es geschieht dies durch ein Zahnrad und einen durch einen Griff gedrehten Trieb. Unter dem Griff ist ein Zifferblatt mit einem Zeiger, dessen Zweck nachher angegeben werden soll.

Wir wollen der oberen Sirene zuerst unsere Aufmerksamkeit zuwenden. Vermittelst einer Kautschukröhre verbinde ich die Oeffnung t^1 mit dem Blasebalg und lasse Luft in C' eintreten. Ihre Scheibe dreht sich, und wir erhalten alle Resultate, die wir schon mit der Dove'schen Sirene erhalten hatten. Die Tonhöhe ist jetzt constant. Ich drehe jetzt den Griff so, dass die Löcher des Cylinders C' denjenigen der Scheibe begegnen; es ist klar, dass die beiden Oeffnungsreihen jetzt schneller an einander vorüber gehen müssen als vorher, wo der Cylinder stillstand. Eine sofortige Erhöhung des Tones ist die Folge. Kehren wir die Bewegung des Griffs um, so gehen die Löcher langsamer an einander vorüber, als wenn der Cylinder C' still steht, und in diesem Falle beobachten Sie beim Drehen des Griffs das augenblickliche Sinken der Tonhöhe. Drehen wir in schnellem Wechsel den Griff nach rechts und nach links, so erhalten wir dies abwechselnde Steigen und Fallen der Tonhöhe. Eine sehr bemerkenswerthe Wirkung dieser Art kann auf jeder Eisenbahnstation beim Durchgange eines Schnellzuges beobachtet werden. Während seiner Annäherung werden die durch den Pfiff ausgestossenen Schallwellen verkürzt und eine grössere Anzahl von ihnen gelangt in einer gegebenen Zeit zu dem

Ohr. Während seiner Entfernung haben wir eine Verlängerung der Schallwellen. Die Folge ist, dass, wenn der Zug sich nähert, der Pfiff einen höheren Ton hat, und wenn er sich entfernt, einen tieferen, als wenn der Zug still steht. Man nimmt daher ein Fallen der Tonhöhe wahr, während der Zug an der Station vorbeifährt [1]). Es ist dies die Grundlage der Doppler'schen Theorie der farbigen Sterne. Er nimmt an, dass alle Sterne weiss seien, dass aber einige von ihnen sich schnell von uns entfernen, und indem sich dadurch ihre Lichtwellen verlängern, roth erscheinen, andere sich uns schnell nähern und indem sich dadurch ihre Lichtwellen verkürzen, sie grün oder blau werden.

Diese Theorie ist äusserst geistreich; ob sie aber richtig ist, ist mehr als zweifelhaft.

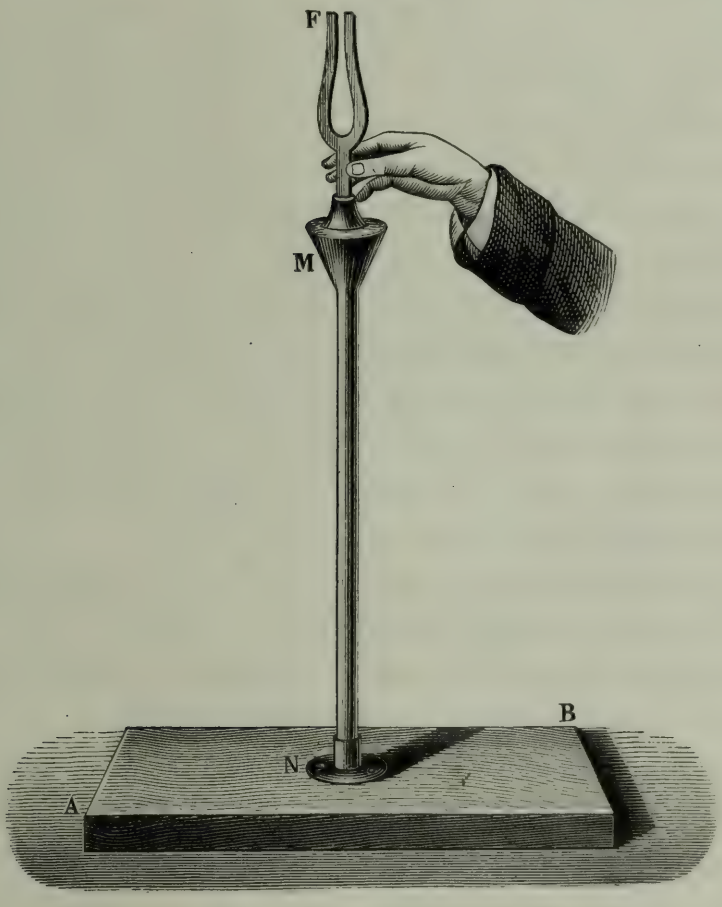
§. 13. Fortpflanzung der musikalischen Töne durch Flüssigkeiten und durch feste Körper.

Wir haben bisher die Fortpflanzung der Töne durch die Luft betrachtet. Sie werden aber ebenso gut durch flüssige und feste Körper fortgepflanzt. Wenn eine Stimmgabel, die in einen kleinen hölzernen Fuss geschraubt ist, in freier Luft schwingt, hören nur die Personen in ihrer unmittelbaren Nähe den Ton. Tauche ich den Fuss in ein Glas Wasser, so ist der musikalische Ton hörbar: die Schwingungen sind durch das Wasser zur Luft fortgepflanzt worden. Die 1 m lange Röhre MN

[1]) Herr Buys Ballot stellte zuerst Versuche über diesen Gegenstand auf einer holländischen Eisenbahn an und Herr Scott Russell später in England. Der Gedanke Doppler's wird jetzt benutzt, um aus Wechseln der Wellenlänge Bewegungen auf der Sonne und solche auf den Fixsternen gegenüber der Erde zu bestimmen.

(Fig. 30) steht aufrecht auf einem hölzernen Brette *AB*. Die Röhre endet oben in einen Trichter, den ich bis zum Rande mit Wasser fülle. Ich bringe wie vorher die Gabel *F* in Schwingungen; sowie ich ihren Fuss in den Trichter *M* tauche, erklingt ein Ton. Ich muss indess vorausschicken, dass bei diesem Versuche das

Fig. 30.



Holzbrett der eigentlich tönende Körper ist. Es ist durch die Gabel in Schwingungen versetzt worden, die Schwingungen sind aber dem Brett durch das Wasser mitgetheilt worden. Durch dasselbe Medium werden die Schwingungen dem Gehörnerv mitgetheilt, dessen Endfasern in eine Flüssigkeit eingesenkt sind. Wenn wir

Quecksilber statt Wasser nehmen, erhalten wir ein ähnliches Resultat.

Die Sirene verdankt ihren Namen der Fähigkeit, auch unter Wasser zu singen. Das Gefäss vor dem Tische ist halb mit Wasser gefüllt und eine darin befindliche Sirene ganz in das Wasser versenkt. Drehe ich diesen Hahn, so lasse ich Wasser aus den Wasserleitungsröhren in das Instrument treten. Seine Scheibe dreht sich jetzt, und ein Ton von rasch zunehmender Höhe erklingt aus dem Gefäss. Die Höhe steigt schnell, weil das schwere und unter hohem Druck stehende Wasser die Scheibe bald bis zum Maximum ihrer Rotationsgeschwindigkeit treibt. Vermindere ich das Zuströmen, so lässt die Bewegung nach und die Höhe sinkt. Oeffne und schliesse ich abwechselnd den Hahn, so lasse ich den Gesang der Sirene in einer wilden und melancholischen Weise steigen und fallen. Sie würden schwerlich glauben, dass sich die Seefahrer um eines solchen Gesanges willen dem Tode weihen konnten.

Die Fortpflanzung der Töne durch feste Körper kann ebenfalls leicht nachgewiesen werden. Vor Ihnen steht ein Holzstab von 10 m Länge, der von diesem Tische durch eine Oeffnung in der Decke nach der freien Luft führt. Das untere Ende dieses Stabes ruht auf einem Holzbrette, auf welches ich die Töne eines, am oberen Ende des Stabes befestigten Körpers übertragen kann. Mein Assistent hält oben eine Stimmgabel in der Hand. Er schlägt die Gabel gegen ein Kissen; sie schwingt, aber Sie hören nichts. Er hält nun den Fuss der Gabel gegen das Ende des Stabes, und augenblicklich wird das Holzbrett auf dem Tische musikalisch. Die Höhe des Tones ist genau die der Stimmgabel; das Holz hat sich der Höhe gegenüber vollkommen passiv

verhalten, indem es genau, ohne irgend eine Veränderung, die ihm mitgetheilten Schwingungen an die Luft übertragen hat. Mit einer anderen Gabel wird ein Ton von anderer Höhe erzeugt. Ich könnte so fünfzig Gabeln statt zwei verwenden und einen Holzstab von 100 m statt 10 m; das Holz würde gerade nur die ihm mitgetheilten Schwingungen abgeben und keine anderen.

Wir können jetzt einen sehr schönen Versuch verstehen, den wir Sir Charles Wheatstone verdanken und den ich jetzt vor Ihnen anstellen will. In einem Zimmer, zwei Stockwerke unter diesem Saal, steht ein Piano. Durch die beiden Stockwerke geht eine Blechröhre von 6 cm im Durchmesser, und in der Axe der Röhre ist ein tannener Stab befestigt, dessen Ende aus dem Boden vor diesem Tische hervorragt. Der Stab ist von Kautschukbändern umgeben, welche sich an die Blechröhre vollständig anschliessen. Das untere Ende des Stabes ruht auf dem Resonanzboden des Pianos, das obere sehen Sie vor sich. Ein Künstler spielt in diesem Augenblick das Instrument, aber Sie hören keinen Ton. Sowie ich indess eine Violine auf das Ende des Stabes lege, wird das Instrument augenblicklich musikalisch, nicht durch die Schwingungen seiner eigenen Saiten, sondern durch die des Pianos. Ich nehme die Violine fort, der Ton hört auf; ich lege an ihren Platz eine Guitarre, und die Musik erwacht wieder. Ich ersetze die Violine und die Guitarre durch ein gewöhnliches Holzbrett; es tönt ebenfalls. Hier ist endlich noch eine Harfe, gegen deren Resonanzboden das Ende des Holzstabes drückt; jeder Ton des Pianos erklingt vor Ihnen. Ich hebe die Harfe soweit in die Höhe, dass ihre Verbindung mit dem Piano unterbrochen ist, der Schall verschwindet; in dem Augenblick aber, wo der Resonanzboden den

Stab berührt, ist die Musik wieder da. Der Ton des Pianos gleicht so sehr dem der Harfe, dass man sich kaum des Eindrucks erwehren kann, dass die Musik, die man hört, nicht dem letzteren Instrument zuzuschreiben sei. Eine ungebildete Person könnte leicht glauben, dass Zauberei „oder Spiritismus“ bei der Erzeugung dieser Musik im Spiele sei.

Welch merkwürdige Uebertragung der Wirkung bietet sich hier der Ueberlegung dar. Nach dem Willen des Musikers berühren seine Finger die Tasten; der Hammer schlägt gegen die Saiten, und der rohe mechanische Schlag wird in Schwingungen zerlegt. Die Schwingungen theilen sich dem Resonanzboden des Pianos mit. Auf demselben ruht das eine Ende des Holzstabes, welcher zu einer scharfen Schneide zugeschärft worden ist, damit er leichter zwischen die Saiten eingeschoben werden kann. Durch diese Schneide und den Stab entlang werden mit unfehlbarer Genauigkeit die vielfach verschlungenen Impulse getragen, die durch die Anschläge der zehn flüchtigen Finger erzeugt worden sind. Auf den Resonanzboden der vor Ihnen stehenden Harfe überträgt der Stab genau die Schwingungen, deren Träger er war. Dieser zweite Resonanzboden pflanzt die Bewegung zur Luft fort und zerschneidet und jagt sie in so äusserst complicirte Gestalten, dass man nur verworrene Eindrücke von dem Stoss und Durcheinanderwirbeln der Schallwellen erwarten sollte. Das wunderbar organisirte menschliche Ohr nimmt aber jede besondere Gestaltung der Bewegung auf, und aller Streit und Kampf und alle Verwirrung löst sich zuletzt im Gehirn des Menschen zu Musik auf[1]).

[1]) Eine gewöhnliche Spieldose kann bei diesem Versuch das Piano ersetzen.

Uebersicht der zweiten Vorlesung.

Ein musikalischer Ton wird durch Schallwellen erzeugt, die mit hinlänglicher Geschwindigkeit in regelmässigen Intervallen auf einander folgen.

Geräusch wird durch eine unregelmässige Aufeinanderfolge von Schallwellen erzeugt.

Ein musikalischer Ton kann durch Schläge erzeugt werden, die einander schnell und regelmässig folgen. Die Schläge einer Karte gegen die Zähne eines sich drehenden Rades werden gewöhnlich dazu benutzt, um diesen Punkt zu erläutern.

Ein musikalischer Ton kann auch durch auf einander folgende Luftimpulse erzeugt werden. Die Sirene ist ein Instrument, durch das solche Impulse erzeugt werden können.

Die Höhe eines musikalischen Tones hängt nur von der Zahl der Schwingungen ab, die bei seiner Erzeugung in Betracht kommen. Je schneller die Schwingungen auf einander folgen, desto höher der Ton.

Mit Hülfe der Sirene kann die Zahl der Schwingungen jedes tönenden Körpers bestimmt werden. Man braucht nur den Ton der Sirene und den des Körpers auf gleiche Höhe zu bringen und beide Töne für eine gewisse Zeit im Einklange zu erhalten, um durch das Zählerwerk der Sirene bestimmen zu können, wie viel Impulse von dem Instrument in dieser Zeit ausgegangen sind. Diese Zahl drückt die Zahl der Schwingungen des tönenden Körpers aus.

Wenn ein Körper, der einen musikalischen Ton geben kann, z. B. eine Stimmgabel, schwingt, so erzeugt sie in der sie umgebenden Luft Schallwellen, von denen eine jede aus einer Verdichtung und einer Verdünnung besteht.

Die Länge der Schallwelle wird von einer Verdichtung bis zur folgenden oder von einer Verdünnung bis zu der folgenden gemessen.

Man findet die Wellenlänge, wenn man die Geschwindigkeit des Schalls in der Secunde durch die Zahl der Schwingungen des tönenden Körpers in einer Secunde dividirt.

So erzeugt eine Stimmgabel, die 256 Mal in einer Secunde schwingt, in Luft von 15° C., wo die Geschwindigkeit 338,6 m beträgt, Wellen von 1,32 m Länge. Zwei andere Gabeln, die resp. 320 und 384 Mal in einer Secunde schwingen, erzeugen entsprechend Wellen von 1,07 und 0,89 m Länge.

Unter einer Schwingung versteht man in England und Deutschland eine Bewegung hin und her. Dies ist eine ganze Schwingung. In Frankreich dagegen versteht man unter einer Schwingung eine Bewegung hin oder her. Die französischen Schwingungen sind bei uns halbe Schwingungen.

Die Zeit, in der ein Lufttheilchen, über das eine Schallwelle geht, eine ganze Schwingung zurücklegt, ist dieselbe, in welcher die Welle einen ihrer eigenen Länge gleichen Weg durchläuft.

Je höher die Temperatur der Luft, desto länger sind die Schallwellen, welche jeder besonderen Schwingungszahl entsprechen. Ist die Wellenlänge und die Schwingungszahl gegeben, so ist die Temperatur der Luft leicht daraus abzuleiten.

Das menschliche Gehör ist in der Wahrnehmung von Tönen begrenzt. Erfolgen weniger Schwingungen als 16 in einer Secunde, so nehmen wir nur getrennte Stösse wahr. Uebersteigt ihre Zahl 38000 in einer Secunde, so hört die Wahrnehmung des Tones vollständig auf. Das beste Gehör erstreckt sich ungefähr über 11 Octaven; aber ein Gehör, das nur sechs oder sieben Octaven umfasst, ist nicht ungewöhnlich.

Die in der Musik verwendeten Töne werden durch Schwingungen erzeugt, die zwischen den Grenzen von 40 und 4000 in einer Secunde liegen. Sie umfassen 7 Octaven.

Der Umfang des Gehörs übertrifft bei Weitem den des Auges, welcher kaum eine Octave übersteigt.

Mit Hülfe der Eustachi'schen Röhre, die sich beim Schlucken öffnet, wird der Druck der Luft zu beiden Seiten des Trommelfells ausgeglichen.

Durch die Verdichtung oder Verdünnung der Luft hinter dem Trommelfell kann Taubheit für tiefe Töne erzeugt werden.

Bei der Annäherung eines Eisenbahnzuges wird die Höhe des Pfiffs höher, bei dem Entfernen tiefer, als wenn der Zug in Ruhe ist.

Musikalische Töne werden durch flüssige und feste Körper fortgepflanzt. Solche Töne können von einem Zimmer ins andere übertragen werden, z. B. vom untersten Stock bis zu dem Speicher eines Hauses durch mehrere Stockwerke hindurch, wo der Schall in den zwischenliegenden Zimmern ungehört bleibt und nur hörbar wird, wenn die Schwingungen einem geeigneten Resonanzboden mitgetheilt werden.

Dritte Vorlesung.

Schwingungen von Saiten. — Einfluss der Resonanzböden. — Gesetze der schwingenden Saiten. — Stehende und fortschreitende Wellen. — Knoten und Bäuche. — Anwendung der Resultate auf die Schwingungen der tönenden Saiten. — Versuche von Melde. — Saiten, die durch Stimmgabeln in Schwingungen versetzt werden. — Die Gesetze der Schwingungen auf diese Weise erklärt. — Harmonische Töne der Saiten. — Erklärung von Timbre, von Obertönen und Klangfarbe. — Aufhebung bestimmter harmonischer Obertöne. — Bedingungen für die Intensität der harmonischen Obertöne. — Optische Untersuchung der Schwingungen einer Claviersaite.

---

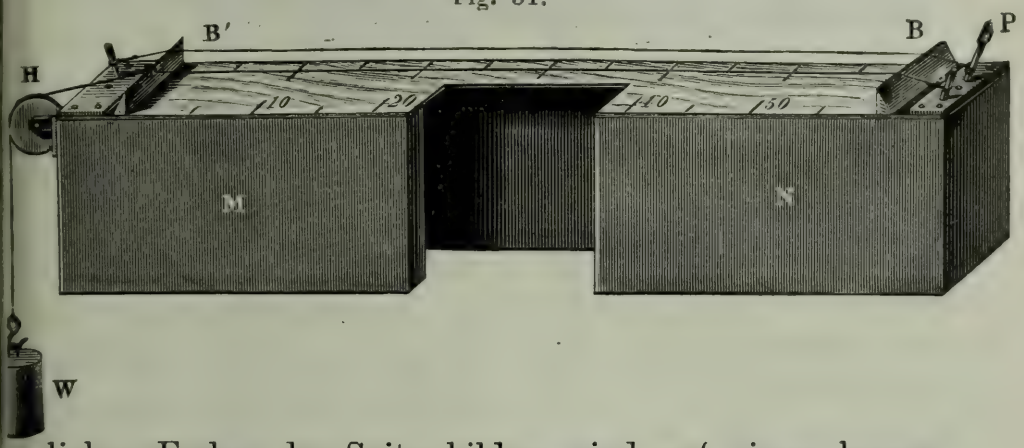
§. 1. Schwingungen von Saiten. — Nutzen der Resonanzböden.

Wir wollen heute unsere Betrachtungen mit den Schwingungen der Saiten oder Drähte beginnen, um zu erfahren, wie solche Körper als Quellen von musikalischen Tönen zu verwenden sind, und um die Gesetze ihrer Schwingungen zu erforschen.

Eine Saite muss zwischen zwei festen Punkten ausgespannt sein, wenn sie transversal oder senkrecht zu ihrer Länge schwingen soll. Vor Ihnen steht ein Instrument (Fig. 31), auf welchem Drähte so ausgespannt werden können, dass ihre Schwingungen hörbar werden. Von dem Stift s, an den das eine Ende einer

Saite befestigt ist, geht die Saite über zwei Stege B und B' und dann über die sehr leicht bewegliche Rolle H. Zuletzt wird die Saite noch durch ein Gewicht W von 14 kg, das an ihrem Ende befestigt ist, straff gespannt. Die Stege B und B', die die eigent-

Fig. 31.

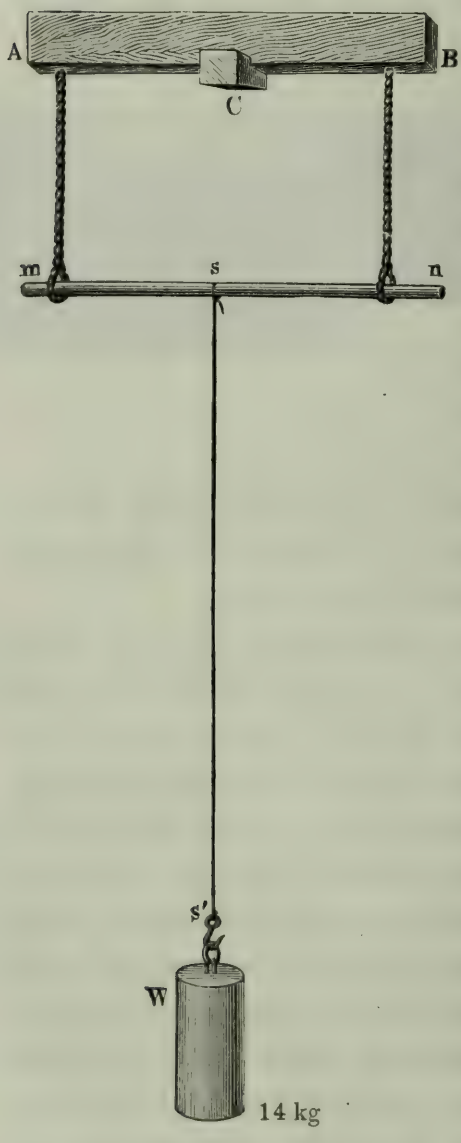


lichen Enden der Saite bilden, sind auf einem langen hölzernen Kasten MN befestigt. Man nennt das ganze Instrument Monochord oder Sonometer.

Fasse ich die gespannte Metallsaite BB' in ihrer Mitte und ziehe sie seitwärts, so springt sie in ihre erste Lage zurück, geht darüber hinaus, kehrt zurück und schwingt so eine Zeit lang um ihre Gleichgewichtslage hin und her. Sie hören einen Ton, aber die Schallwellen, die jetzt Ihre Ohren treffen, kommen nicht unmittelbar von der Saite. Die Quantität der Bewegung, die ein solcher dünner Körper der Luft mittheilen kann, ist zu gering, um in einer grossen Entfernung gehört werden zu können. Die Saite ist aber straff über die beiden Stege BB' gespannt, und wenn sie schwingt, werden ihre Erschütterungen durch die Stege der ganzen Masse des Kastens MN und der Luft in demselben mitgetheilt, so dass diese die eigentlich tönenden Körper werden.

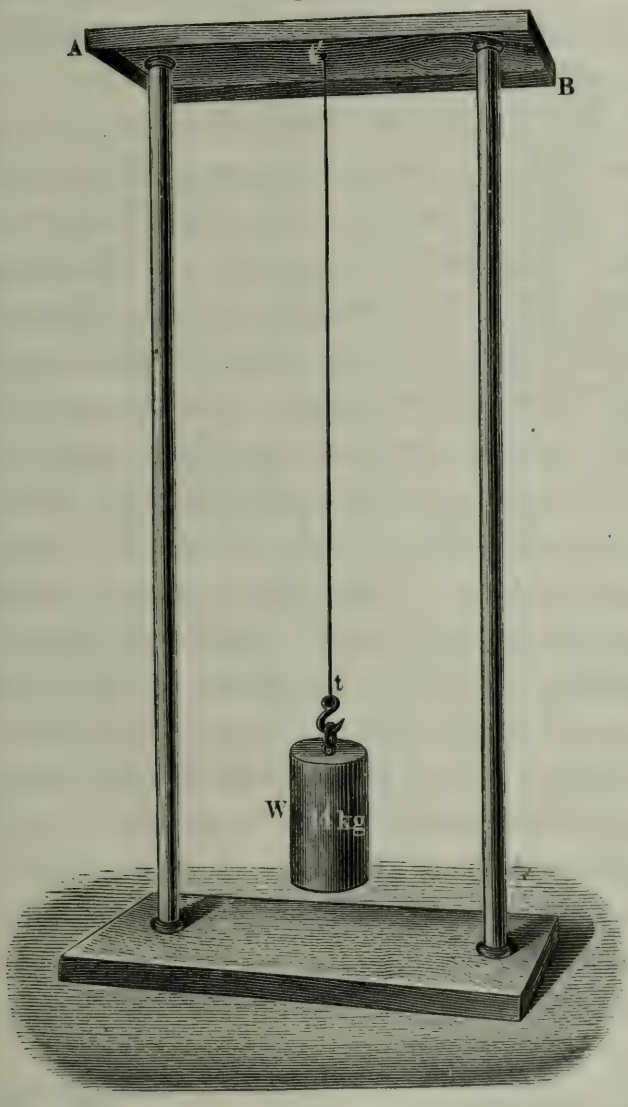
Durch folgende Versuche kann man beweisen, dass die Schwingungen der Saite allein nicht genügen, um den Ton zu erzeugen: AB (Fig. 32) ist ein Stück Holz, das über eine eiserne Klammer C gelegt worden ist. Von jedem Ende des Stückes Holz hängt eine, in einer Schlinge endende Schnur herab, während durch beide Schlingen ein eiserner Stab mn gelegt worden ist. An der Mitte des Eisenstabes ist ein Stahldraht ss' befestigt, der durch ein Gewicht W von 14 kg gespannt wird. Der Draht ist auf diese Weise von allen grossen Oberflächen getrennt, denen er seine Bewegung mittheilen könnte. Reisse ich den Draht ss' in der Mitte, so schwingt er heftig, aber selbst die Nächststehenden hören keinen Ton. Die Bewegung, die der Luft mitgetheilt wird, ist zu unbedeutend, um auf den Gehörnerven zu wirken. Ein zweiter Draht tt' (Fig 33) von derselben Länge, Dicke und aus demselben Stoff bestehend wie ss' ist durch eines seiner Enden an das Holzbrett AB befestigt. Auch dieser Draht trägt ein Gewicht W von 14 kg

Fig. 32.



Und endlich haben wir unseren früheren Draht (Fig. 31), der über die Stege BB' des Monochords geht, sonst aber den beiden anderen vollkommen gleich ist und auch wie sie durch das Gewicht W von 14 kg gespannt wird. Wenn der Draht tt' (Fig. 33) schwingt, so hören Sie Alle deutlich den Ton. Obgleich nur ein Ende des Drahtes mit dem Brette AB verbunden ist, so genügen die ihm mitgetheilten Schwingungen doch, das Brett in einen tönenden Körper zu verwandeln. Ich schnelle endlich den Draht des Monochords MN (Fig. 31); der Ton ist hier laut und voll, denn das Instrument wurde besonders dazu construirt, um die Schwingungen des Drahtes aufzunehmen.

Fig. 33.



Durch diese Versuche wird bewiesen, wie wichtig es ist, besondere mittönende Apparate bei den Saiten-

instrumenten zu verwenden. Es sind nicht die Saiten der Harfe, der Laute, des Claviers, der Violine, die die Luft in tönende Schwingungen versetzen. Es sind die grossen, mit den Saiten verbundenen Oberflächen und die zwischen denselben eingeschlossene Luft. Die Güte dieser Instrumente hängt fast gänzlich von der Qualität und Anordnung ihrer Resonanzböden ab [1]).

Wir wollen die Violine als Beispiel nehmen. Sie wird oder soll aus Holz von möglichst grosser Elasticität gefertigt werden. Unvollkommen elastisches Holz verbraucht die ihm mitgetheilte Bewegung zur Reibung seiner eigenen Moleküle; die Bewegung wird in Wärme statt in Schall verwandelt. Die Violinsaiten gehen von dem „Saitenhalter" dieses Instrumentes über den „Steg" zu den „Wirbeln", deren Drehung die Spannung der Saiten regelt. Der Bogen wird über die Saite an einem Punkt gezogen, der ungefähr $^1/_{10}$ der Länge der Saite von dem Steg entfernt ist. Die beiden „Füsse" des Steges ruhen auf dem nachgiebigsten Theile der „Decke" der Violine, nämlich zwischen den beiden *f* Löchern. Ein Fuss ist oben auf einem kurzen Stab, dem „Stimmstock", befestigt, der von der Decke zum Boden durch das Innere der Violine geht. Dieser Fuss des Steges wird hierdurch festgestellt, und nur durch den anderen Fuss, der nicht so gestützt wird, werden die Schwingungen dem Holz des Instrumentes mitgetheilt und von diesem der inneren und äusseren Luft. Der Klang des Holzes

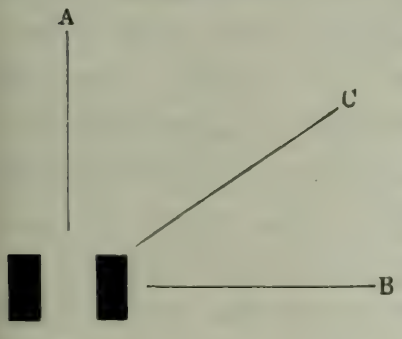
[1]) Um den Einfluss grosser schwingender Oberflächen auf die Mittheilung der Schallbewegung an die Luft zu beweisen, schloss Herr Kilburn eine Spieldose in ein Futteral von dickem Filz ein. Aus demselben ragte ein Holzstab hervor, der auf der Dose ruhte. Wenn die Dose spielte, hörte man so lange nichts, als der Stab allein herausragte; sowie aber eine dünne Holzscheibe an dem Stabe befestigt war, wurde die Musik augenblicklich hörbar.

einer Violine wird durch das Alter weicher. Auch übt das Spielen selbst einen wohlthätigen Einfluss, indem es augenscheinlich die anfangs widerspenstigen Moleküle des Holzes zwingt, sich den verschiedenen Schwingungsarten der Saiten anzupassen.

Professor Stokes hat auf die mittönenden Bretter denselben sinnreichen Gedanken übertragen, der ihm gestattete, die Beobachtung Sir John Leslie's über die Wirkung des Wasserstoffs auf den Schall zu erklären. Wenn eine Saite allein schwingt, so schlüpft die Luft leicht um den kleinen Körper hin und her, und verhindert die Verdichtungen und Verdünnungen. Es geschieht dies aber nicht so leicht, wenn der schwingende Körper grössere Dimensionen hat. Die Luft kann sich dann nicht von vorn fort bewegen, auch nicht nach hinten gleiten, ehe sie nicht beträchtlich verdichtet oder verdünnt ist. Daher können Schallwellen durch solche schwingende Körper erzeugt und laute Töne hervorgerufen werden, während die dünnen Saiten, die sie in Schwingung versetzten, wenn sie allein wirken, ganz unhörbar sind.

Professor Stokes hat durch Versuche die Zunahme der Intensität des Schalls gezeigt, falls seitliche Bewegung verhindert wurde. Die beiden schwarzen Rechtecke in Fig. 34 sollen den Querschnitt der Zinken einer Stimmgabel vorstellen. Sobald sie in Schwingung versetzt worden sind, legen wir ein Stück Papier oder die Schneide der Klinge eines breiten Messers der Axe der Gabel parallel und zwar der Gabel so nahe als möglich, ohne sie zu berühren.

Fig. 34.



Wird das Hinderniss so angebracht, dass der Querschnitt desselben A oder B ist, so wird freilich keine Wirkung erzeugt; ist es aber bei C, so dass es die gegenseitige Hin- und Herbewegung der Luft hindert, die die Verdichtungen und Verdünnungen zu verhindern strebt, so wird der Ton viel stärker.

§. 2. Gesetze der schwingenden Saiten.

Haben wir so gesehen, wie die Schwingungen der Saiten bei der Musik benutzt werden, so müssen wir nun zunächst die Gesetze dieser Schwingungen erforschen. Ich zupfe die Saite BB' (Fig. 31) in ihrer Mitte. Der Ton, den wir jetzt hören, ist der Grundton oder der tiefste Ton der Saite; dieser entsteht, wenn sie als Ganzes hin- und herschwingt. Stelle ich einen beweglichen Steg unter die Mitte der Saite und drücke die Saite gegen den Steg, so theile ich sie in zwei gleiche Theile. Schnellen wir den einen oder anderen Theil in seinem Mittelpunkte, so erhalten wir einen musikalischen Ton, den Viele von Ihnen als eine Octave des Grundtones erkennen werden. Es wird in allen Fällen und bei allen Instrumenten die Octave des Tones erzeugt, wenn man die Zahl der Schwingungen verdoppelt. Ueberdies kann durch die Theorie sowohl, wie auch experimentell durch die Sirene bewiesen werden, dass die halbe Saite genau doppelt so oft wie die ganze schwingt. Ebenso kann man beweisen, dass ein Drittel der Saite drei Mal so oft schwingt und einen Ton erzeugt, der eine Quinte über der Octave liegt, während ein Viertel der Saite vier Mal so oft schwingt und die zweit höhere Octave der Saite erzeugt. Allgemein ausgedrückt ist die Zahl der Schwingungen der Länge der Saite umgekehrt proportional. Es ist dies unser erstes Gesetz.

Je straffer die Saite gespannt ist, desto schneller sind ihre Schwingungen. Ich lasse diese verhältnissmässig schlaffe Saite schwingen, und Sie hören ihren tiefen Grundton. Drehe ich den Wirbel, um den das eine Ende geschlungen ist, so spanne ich die Saite; der Ton ist jetzt höher. Ich fasse mit meiner linken Hand das Gewicht W an dem Draht BB' unseres Monochords, schnelle den Draht mit den Fingern meiner rechten Hand und drücke abwechselnd auf das Gewicht und hebe es. Die schnellen Veränderungen der Spannung werden durch einen wechselnden klagenden Ton ausgedrückt. Die Zahl der Schwingungen in der Zeiteinheit steht in einem bestimmten Verhältniss zu der spannenden Kraft. Befestigen wir verschiedene Gewichte an dem Ende des Drahtes BB' und bestimmen in jedem Falle die Zahl seiner Schwingungen in einer Secunde, so finden wir, dass die so erhaltenen Zahlen den Quadratwurzeln der spannenden Gewichte proportional sind. Eine Saite, die z. B. durch ein Gewicht von 1 kg gespannt wird, erzeugt eine gewisse Zahl von Schwingungen in der Secunde; wollen wir diese Zahl verdoppeln, so müssen wir sie durch ein Gewicht von 4 kg spannen; wollen wir die Zahl verdreifachen, so müssen wir ein Gewicht von 9 kg anwenden u. s. f. Es ist dies unser zweites Gesetz.

Die Schwingungen einer Saite hängen auch von ihrer Dicke ab; behalten wir das gleiche spannende Gewicht, die gleiche Länge und dasselbe Material der Saite bei, so ändert sich die Zahl der Schwingungen der Dicke der Saite umgekehrt proportional. Hat daher von zwei Saiten von demselben Stoff, derselben Länge und derselben Spannung die eine den doppelten Durchmesser wie die andere, so wird die dünnere Saite

doppelt so viel Schwingungen in derselben Zeit machen wie die andere. Ist eine Saite drei Mal so dick als eine andere, so wird die letztere die dreifache Zahl der Schwingungen ausführen u. s. f. Es ist dies unser drittes Gesetz.

Endlich hängen die Schwingungen einer Saite von der Dichtigkeit ihres Stoffes ab. So werden z. B. ein Platin- und ein Eisendraht von derselben Länge und Dicke, welche durch dasselbe Gewicht gespannt worden sind, nicht gleich viel Schwingungen ausführen. Denn während das specifische Gewicht des Eisens oder auch seine Dichtigkeit 7,8 ist, so ist die des Platins 21,5. Bleiben die übrigen Bedingungen dieselben, so ist die Zahl der Schwingungen der Quadratwurzel der Dichtigkeit der Saite umgekehrt proportional. Ist daher die Dichtigkeit einer Saite ein Viertel von der einer anderen von derselben Länge, Dicke und Spannung, so wird sie ihre Schwingungen doppelt so schnell ausführen; beträgt ihre Dichtigkeit ein Neuntel der anderen, so schwingt sie drei Mal so oft u. s. f. Es ist dies unser viertes Gesetz. Die beiden letzten Gesetze können wir zusammen so ausdrücken: Die Zahl der Schwingungen ist der Quadratwurzel des Gewichtes der Saite umgekehrt proportional.

Bei der Violine und anderen Saiteninstrumenten verändern wir die Dicke statt der Länge, um die tieferen Töne zu erhalten. Bei dem Clavier vermehren wir nicht nur die Dicke der Drähte, die die Basstöne erzeugen sollen, sondern wir beschweren sie auch noch, indem wir eine fremde Substanz herumwickeln. Sie gleichen schwer beladenen Pferden und schwingen langsamer in Folge des grösseren Gewichtes, welches durch ihre Elasticität bewegt werden muss.

§. 3. Mechanische Illustration der Schwingungen. — Fortschreitende und stehende Wellen. — Bäuche und Knoten.

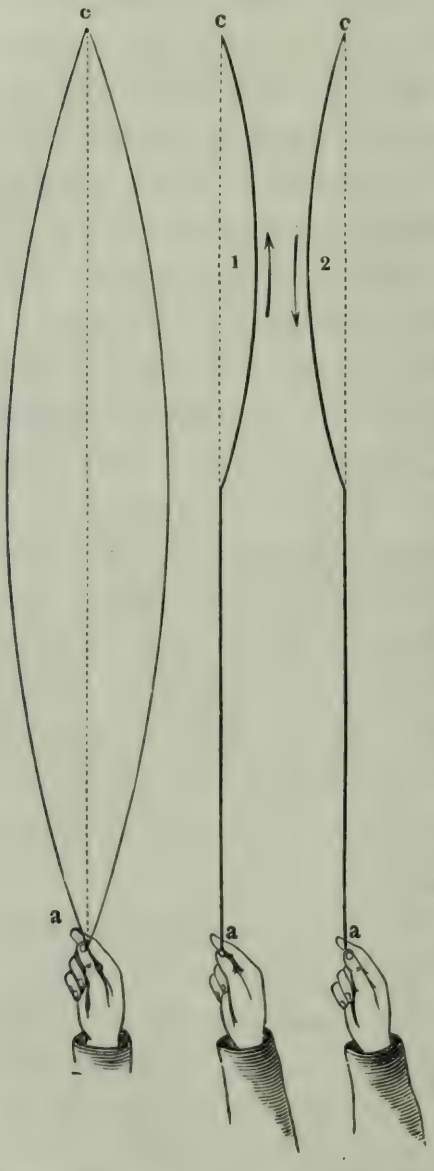
Diese angeführten vier Gesetze regeln die transversalen Schwingungen der Saiten. Wir gehen nun zu einigen mit ihnen verwandten Erscheinungen über, die, wenn sie auch complicirte mechanische Anschauungen verlangen, doch bei erhöhter Aufmerksamkeit vollkommen verstanden werden können. Ihr Verständniss ist unumgänglich nöthig, wenn wir die Theorie der Saiteninstrumente vollständig begreifen wollen.

Von der Decke *c* (Fig. 35 a. f. S.) dieses Saales hängt eine 9 m lange Kautschukröhre herab. Ich habe diese Röhre mit Sand gefüllt, damit ihre Bewegungen langsamer und dem Auge leichter sichtbar werden. Ich ergreife das freie Ende *a* und spanne die Röhre ein wenig, und indem ich meine Impulse richtig auf einander folgen lasse, lasse ich sie als Ganzes hin und her schwingen, wie die Abbildung zeigt. Sie hat ihre bestimmte Schwingungsdauer, die von ihrer Länge, Dicke, Spannung und ihrem Gewicht abhängt, und meine Impulse müssen mit dieser Dauer übereinstimmen.

Ich halte die Bewegung auf und erzeuge jetzt durch einen plötzlichen Ruck eine Ausbiegung auf der Röhre, die wie ein Impuls auf ihr bis zum befestigten Ende entlang läuft, wo sich dann die Ausbiegung umkehrt und zu meiner Hand zurückläuft. An dem befestigten Ende der Röhre kehrte der Impuls nach dem Gesetze der Reflexion sowohl seine Lage als auch die Richtung seiner Bewegung um. *c* (Fig. 36 a. f. S.) sei das befestigte Ende der Röhre und *a* das Ende, welches ich in der

Hand halte; hat der Impuls, wenn er *c* erreicht, die in (1) gezeichnete Lage, so nimmt er nach der Reflexion die Lage (2) an. Die Pfeile geben die Richtung des Fortschreitens an. Die Zeit, die der Impuls braucht, um von meiner Hand zum befestigten Ende und zurück zu laufen, ist genau dieselbe, in welcher die Röhre als Ganzes eine ganze Schwingung vollführt. In der That versetzt die Addition dieser Impulse die Röhre als ein Ganzes in continuirliche Schwingungen.

Fig. 35. Fig. 36.

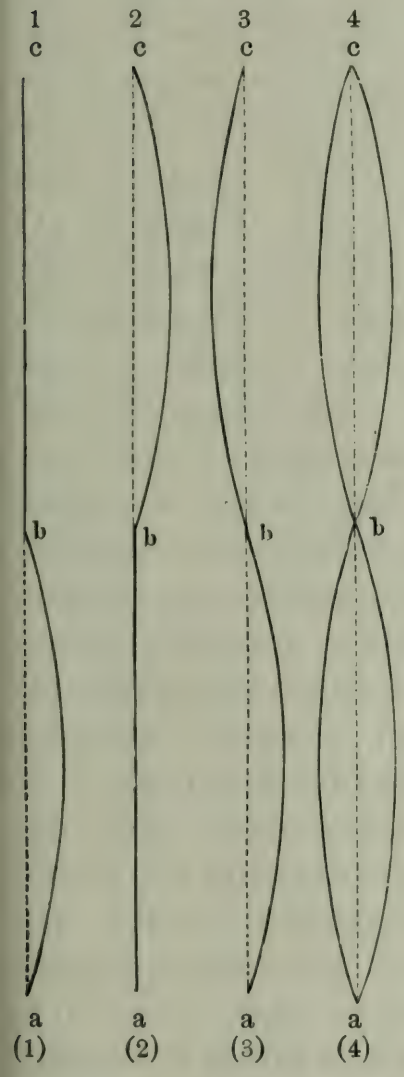


Wenn ich statt eines einzelnen Ruckes dem Ende der Röhre eine Reihe derselben mittheile, und so eine Reihe von Impulsen die Röhre entlang schicke, so wird jeder derselben oben reflectirt, und wir haben nun zu fragen, wie sich die directen und reflectirten Wellen zu einander verhalten.

Die Zeit, die der Stoss braucht, um von meiner Hand bis zum befestigten Ende zu gehen, möge eine Secunde sein; nach einer halben Secunde nimmt er die Stellung *ab* (1), Fig. 37, ein, wo sein vorderster Punkt die Mitte der Röhre erreicht hat. Am Ende der ganzen

Secunde würde er die Stellung *bc* (2) einnehmen, wo sein vorderster Punkt das befestigte Ende *c* der Röhre erreicht hat. In dem Augenblick, wo die Reflexion bei *c* beginnt, mag ein zweiter Ruck bei *a* gegeben werden;

Fig. 37.



da sich der reflectirte Stoss von *c* mit derselben Geschwindigkeit bewegt, wie der directe von *a*, so werden die vordersten Punkte beider zur selben Zeit im Mittelpunkt *b* (3) eintreffen. Was muss geschehen? Die Ausbiegung *ab* will vorwärts nach *c*, und dazu muss der Punkt *b* nach rechts gehen. Die Ausbiegung *cb* will vorwärts nach *a* und dazu muss der Punkt *b* nach links gehen. Der Punkt *b*, der von zwei gleichen Kräften zu derselben Zeit nach zwei entgegengesetzten Richtungen gedrängt wird, wird sich nach keiner derselben bewegen. Unter diesen Verhältnissen werden die beiden Hälften *ab* und *bc* der Röhre schwingen, wie wenn sie von einander unabhängig wären (4). Wir erzeugen so durch die Combination zweier fortschreitender Impulse, von denen der eine direct, der andere reflectirt ist, zwei stehende Impulse auf der Röhre *ac*.

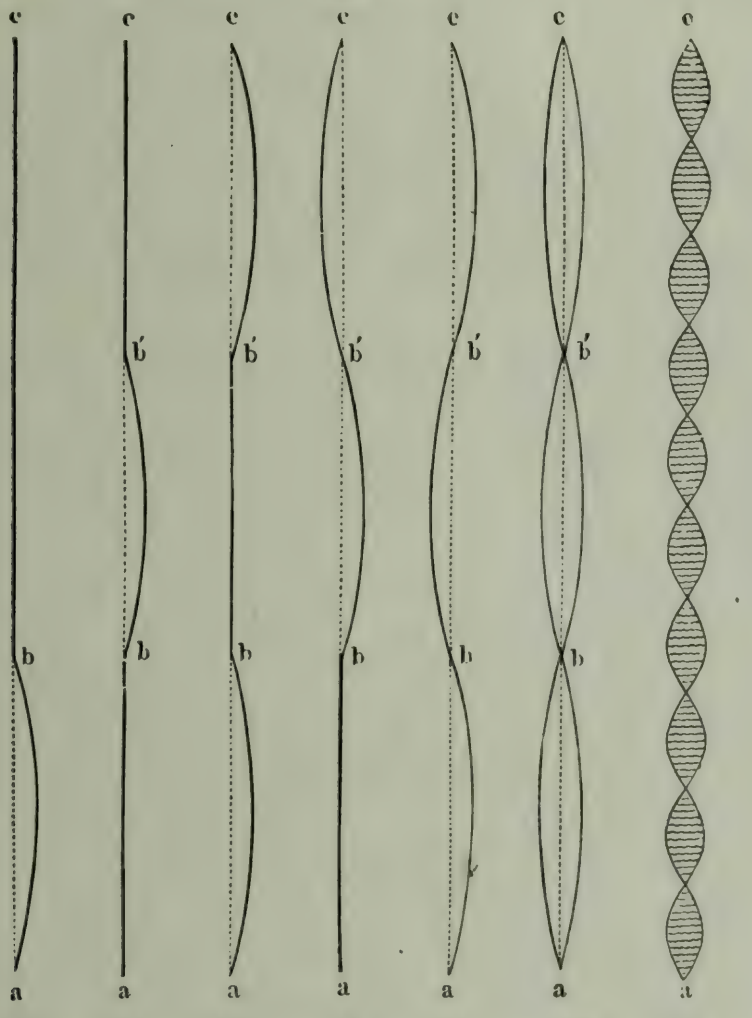
Die schwingenden Theile *ab* und *bc* heissen Bäuche; der Ruhepunkt *b* heisst Knoten.

Ich gebrauche hier den Ausdruck „Impuls“ absichtlich, um Sie nicht durch den gebräuchlicheren Ausdruck Welle zu verwirren. Eine Welle enthält zwei von diesen Impulsen. Sie umfasst sowohl die Ausbiegung als auch die Einbiegung, die der Ausbiegung folgt. Die Länge einer Welle ist daher die doppelte eines Bauches.

Nehmen wir an, dass die Anstösse so auf einander folgen, dass jede Ausbiegung ein Drittel der Länge der Röhre beträgt. Am Ende einer drittel Secunde nach dem Abgang wird der Impuls in der Stellung ab (1) (Fig. 38) sein. In zweidrittel Secunden wird er die Lage bb' (2) (Fig. 38) erreicht haben. In diesem Augenblick mag ein neuer Impuls von a ausgehen; nach Verlauf einer ganzen Secunde vom Beginn der Bewegung an werden wir zwei Ausbiegungen auf der Röhre haben, von denen die eine die Lage ab (3), die andere die Lage $b'c$ (3) einnimmt. Es ist klar, dass das Ende des von c reflectirten Impulses und das Ende des directen, von a ausgehenden, den Punkt b' in demselben Augenblick erreichen werden. Wir haben die Sachlage in (4) dargestellt, wo bb' aufwärts und cb' abwärts schreiten möchte. Da die Wirkung beider auf den Punkt b' in entgegengesetzten Richtungen geschieht, so bleibt der Punkt in Ruhe, und es hat den Anschein, als würde von ihm, wie von einem befestigten Punkte, der Stoss bb' reflectirt, während die Abtheilung $b'c$ wie eine unabhängige Saite schwingen wird. Lassen wir in dem Augenblick, wo bb' (4) bei b' reflectirt wird, einen neuen Impuls von a ausgehen, so wird er b (5) in demselben Augenblick erreichen, wo der von b' reflectirte Impuls b erreicht. Die Impulse werden sich bei b neutralisiren, und wir haben hier einen zweiten Knoten. Theilen wir unsere Anstösse geschickt ein, so

können wir die Röhre in drei Bäuche theilen, die durch zwei Knotenpunkte von einander getrennt sind. So lange die Bewegung dauert, wird die Röhre wie in Fig. 8 schwingen.

Fig. 38.



Die Zahl der so erzeugten Knoten und Bäuche ist der Theorie nach unbegrenzt. Beschleunige ich die Anstösse, so kann ich die Röhre in vier Bäuche theilen, die durch drei Knoten von einander getrennt sind; beschleunige ich sie noch mehr, so habe ich fünf Bäuche

und vier Knoten. Bei dieser Röhre kann die Hand genügend schnell schwingen, um, wie in Fig. 38 a. v. S. (7), zehn Bäuche hervorzurufen. Ist die Spannung constant, so ist die Zahl der Bäuche der Zahl der Schwingungen der Hand proportional. Um 2, 3, 4, 10 Bäuche zu erzeugen, bedarf es einer 2-, 3-, 4-, 10 Mal so grossen Zahl der Schwingungen, als wenn die Röhre als Ganzes schwingt. Folgen die Schwingungen sehr schnell auf einander, so erscheinen die Bäuche wie eine Reihe von grauen Spindeln, die von einander durch dunkle bewegungslose Knoten getrennt sind. Der Versuch ist schön und leicht anzustellen.

Wenn die Hand statt hin und her bewegt zu werden, einen kleinen Kreis beschreibt, so werden die Bäuche „Revolutionsflächen“. Wir können überdies statt der Hand einen Haken nehmen, der durch eine Centrifugalmaschine gedreht wird. Vor Ihnen ist ein 8 m langes Seil, das steifer als die Kautschukröhre mit einem Ende an einem frei beweglichen Wirbel an der Decke des Zimmers befestigt wurde. Drehe ich die Centrifugalmaschine, an der das andere Ende befestigt ist, so kann das Seil in etwa 20 Bäuche getheilt werden, die durch die entsprechenden Knoten von einander getrennt sind. Bei einer anderen Anordnung wurde ein $3^1/_2$ m langer Bindfaden, auf den versilberte Perlen gereiht waren, horizontal zwischen ein verticales Rad und einen freien Wirbel, der an einem festen Ständer befestigt war, gespannt. Durch das Drehen des Rades und die entsprechend richtige Regelung der Spannung und der Geschwindigkeit der Drehung kann man die Perlenschnur zwingen, als Ganzes zu rotiren, und sich nach einander in 2, 3, 4 oder 5 Bäuche zu theilen. Lassen wir auf das Seil einen leuchtenden Lichtstrahl fallen, so be-

schreibt jeder Lichtpunkt auf jeder Perle einen glänzenden Kreis.

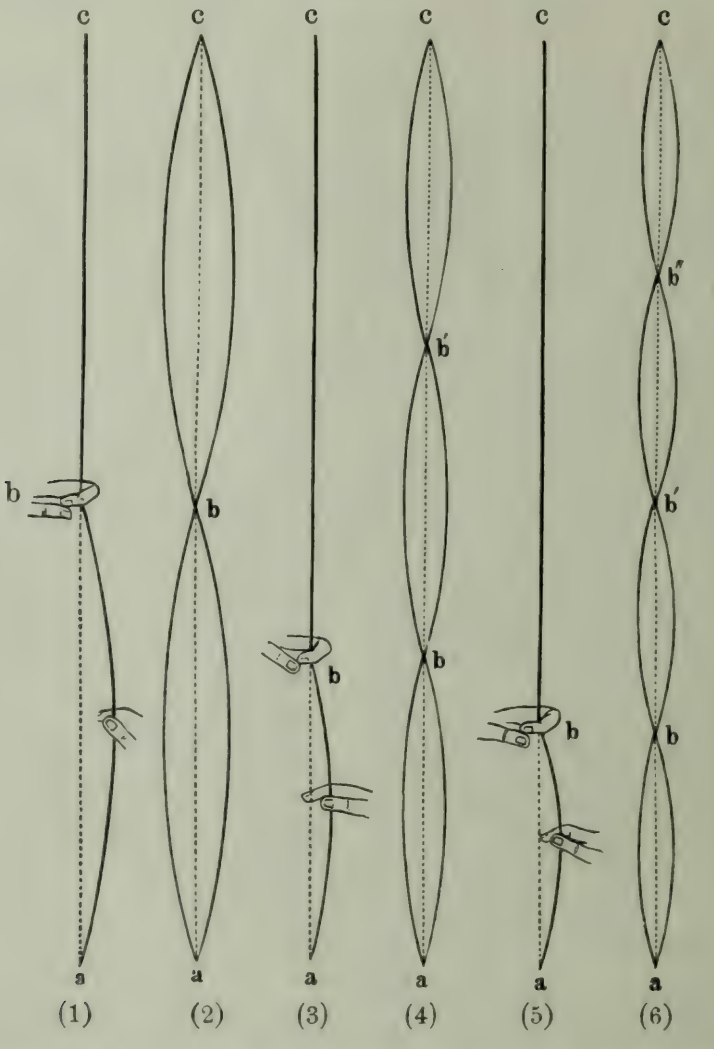
§. 4. Mechanische Beispiele zur Erläuterung der Dämpfung verschiedener Punkte schwingender Saiten.

Die stehenden Wellen wurden zuerst von den Gebrüdern Weber in ihren ausgezeichneten Untersuchungen über die Wellenbewegung besprochen und in der „Wellenlehre“ publicirt. Es ist ein Thema, das Ihre Aufmerksamkeit reichlich belohnen wird, da es Ihnen viele der schwierigsten Erscheinungen der musikalischen Saiten vollkommen erklärt. Um die Beziehung zwischen den beiden Arten von Schwingungen klarer hervortreten zu lassen, will ich unsere letzten Versuche abändern. Eine Kautschukröhre von 3,5 bis 4 m Länge ist von *c* nach *a* (Fig. 39 a. f. S.) gespannt und an zwei Stiften bei *c* und *a* befestigt. Die Röhre ist geschwärzt, und hinter ihr ein Streifen von weissem Papier aufgestellt, um ihre Bewegungen sichtbarer zu machen. Ich umschliesse zuerst die Röhre an ihrem Mittelpunkte *b* (1) mit dem Daumen und Zeigefinger meiner linken Hand, ergreife die Mitte der unteren Hälfte der Röhre *ba* mit meiner rechten Hand und ziehe sie seitwärts. Die untere Hälfte schwingt nicht allein, auch die obere wird in Schwingungen versetzt. Nehme ich meine Hände von der Röhre ganz fort, so fahren ihre beiden Hälften *ab* und *bc* fort zu schwingen, und beide sind durch einen Knoten *b* in der Mitte (2) von einander getrennt.

Ich umschliesse jetzt die Röhre beim Punkt *b* (3) in einem Drittel ihrer Länge vom unteren Ende *a*, fasse *ab* in der Mitte und ziehe sie seitwärts; die Länge *bc* über

meiner Hand theilt sich sogleich in zwei schwingende Bäuche. Nehme ich meine Hände ganz fort, so sehen Sie die ganze Röhre in drei Bäuche getheilt, die von einander durch zwei bewegungslose Knoten b und b' (4)

Fig. 39.



getrennt sind. Ich gehe auf den Punkt b (5) über, der ein Viertel der Länge der Röhre bezeichnet, umschliesse ihn und ziehe den kürzeren Theil seitlich. Der längere Theil über meiner Hand theilt sich sogleich in drei schwingende Theile, so dass, wenn ich meine Hand fort-

ziehe, die ganze Röhre vor Ihnen in vier Bäuche getheilt erscheint, die von einander durch drei Knoten $bb'b''$ (6) getrennt sind. Ebenso zerlege ich die Röhre in fünf schwingende Theile mit vier Knoten.

Diese plötzliche Zerlegung des langen oberen Theiles der Röhre, ohne irgend einen augenscheinlichen Grund, ist sehr überraschend; gönnen Sie mir aber Ihre Aufmerksamkeit für einen Augenblick, so werden Sie finden, dass diese Versuche denen über die Vereinigung der directen und reflectirten Wellenbewegungen sehr ähnlich sind. Sie beobachteten bei den letzteren Versuchen, dass die Hin- und Herbewegung meiner Hand um 2,5 cm genügte, um die mittleren Punkte der Bäuche in Schwingungen von 0,3 m Weite zu versetzen. Wurden die Anstösse richtig eingetheilt, so nahmen sie zu, bis dass die Amplitude der schwingenden Theile bei weitem die der Hand übertraf, die sie erzeugte. Die Hand bildete in der That einen Knotenpunkt, so gering war verhältnissmässig ihre Bewegung. Es ist richtig und gebräuchlich, dass man auch die Enden der Röhre als Knotenpunkte betrachtet.

Betrachten Sie nun den Fall, wie er sich uns in (1) (Fig. 39) darstellt, wo die Röhre in der Mitte umschlossen war, und der untere Theil ab in Schwingungen versetzt wurde, die seiner Länge und Spannung entsprachen. Der Kreis, den ich mit meinem Zeigefinger und Daumen beschrieb, liess die Röhre beim Punkte b durch den Raum von 2,5 cm schwingen, und die Schwingungen hatten auf das obere Ende bc genau denselben Einfluss, wie meine Hand, als sie die hängende Röhre an der Decke als Ganzes (Fig. 35) in Schwingungen versetzte. Statt der periodischen Schwingungen meiner Hand haben wir jetzt die periodischen Schwingungen der oberen

Hälfte der Röhre; und obgleich dieselben an der Stelle bei meinem Zeigefinger und Daumen auf die Weite von 2,5 cm beschränkt sind, häufen sie sich schnell an und erzeugen zuletzt eine Amplitude, die die der Hand bei weitem übertrifft. Dieselbe Erklärung gilt für alle anderen Fälle der Untertheilung. Würde, statt dass wir einen Punkt mit dem Zeigefinger und Daumen umschliessen und den unteren Theil der Röhre seitlich ziehen, derselbe Punkt von der Hand gefasst und in der der Schwingungsdauer des unteren Theils der Röhre entsprechenden Zeit bewegt, so würde entschieden dieselbe Wirkung hervorgerufen. So führen wir beide Wirkungen auf dieselbe Ursache zurück, nämlich auf die Vereinigung der directen und reflectirten Wellenbewegungen.

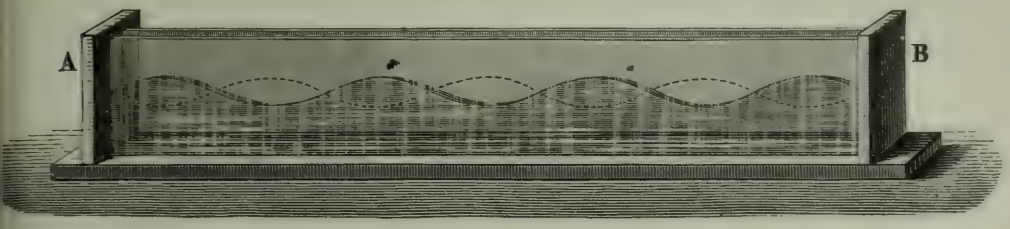
Es ist hier wohl zu beachten, dass, als ich die Röhre durch die periodischen Impulse meiner Hand theilte, keiner ihrer Knoten ganz ohne Bewegung war; denn könnten die Knoten nicht durch eine kleine Amplitude schwingen, so könnte die Bewegung der verschiedenen Theile der Röhre nicht erhalten bleiben.

§. 5. Stehende Wasserwellen.

Was für die Wellenbewegungen einer Kautschukröhre zutrifft, gilt auch für alle übrigen Schwingungen. So gehorchen z. B. Wasserwellen denselben Gesetzen und zeigen durch die Interferenz von directen und reflectirten Wellen ähnliche Erscheinungen. Dieses lange und schmale Gefäss mit gläsernen Seitenwänden (Fig. 40) ist der Wellenrinne der Gebrüder Weber nachgebildet. Es wird bis zur Höhe AB mit gefärbtem Wasser angefüllt. Stosse ich plötzlich das Ende A an, so erzeuge ich eine Welle, die sich nach B fortbewegt und dort reflectirt wird. Entsende ich in den geeigneten Inter-

vallen weitere Wellen, so theile ich die Oberfläche in zwei stehende Wellen. Lasse ich die Anstösse schneller auf einander folgen, so kann ich die Oberfläche in drei, vier (s. die Figur) oder noch mehr stehende Wellen zer-

Fig. 40.



legen, die durch Knoten von einander getrennt sind. Der Wasserträger geht bisweilen in einem Schritt, dass die Oberfläche des Wassers in seinem Gefäss stehende Wellen bildet, deren Höhe sich vermehrt, bis das Wasser über den Rand schlägt. Die Uebung hat den Wasserträger gelehrt, was er zu thun hat; er wechselt den Schritt, ändert die Periode seiner Anstösse und hält so die Anhäufung der Bewegung auf.

Als ich vor einigen Jahren [1]) in einem Coupé eines französischen Eisenbahnwaggons fuhr, stellte ich eine halb mit Wasser gefüllte Flasche auf einen der kleinen Tische. Mein Reisegefährte beobachtete das Wasser mit grossem Interesse. Zuweilen stand es ganz still, zuweilen schwankte es heftig. Für die Reisenden im Waggon war kein Wechsel der Bewegung des Zuges merkbar, dem der Unterschied zugeschrieben werden konnte. Doch enthielt in dem einen Falle das Zittern des Waggons keine Schwingungen, die mit den Schwingungsperioden des Wassers gleichzeitig waren, während in dem anderen Falle solche Schwingungen eintraten. Aus dem Gewirre der Erschütterungen sucht sich das Wasser die richtigen

[1]) In Begleitung von Herrn Thomas Carlyle.

aus, die ihm zugehören und zeigt ihre Gegenwart an, während sie sich für den Reisenden selbst gar nicht bemerkbar machen.

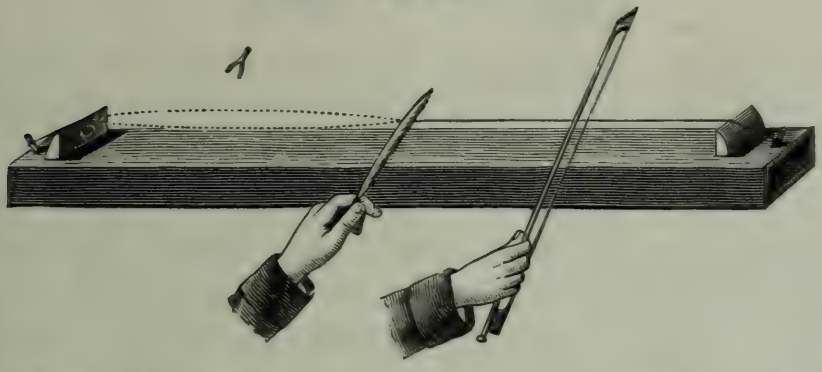
§. 6. Anwendung der mechanischen Beispiele auf Saiten.

Von diesen verhältnissmässig groben, aber darum nicht minder schönen, mechanischen Schwingungen wollen wir zu denen einer tönenden Saite übergehen. Bei den Versuchen mit unserem Monochord, wenn der Draht gekürzt werden soll, benutzte ich einen beweglichen Steg, gegen den der Draht gedrückt wurde, um so dem gedrückten Punkte jede Möglichkeit einer Bewegung zu rauben. Ein so starker Druck ist indess nicht erforderlich. Ich halte den Bart einer Gänsefeder leicht gegen die Mitte der Saite und streiche dann mit dem Violinbogen über die eine ihrer Hälften; die Saite giebt jetzt die Octave des Tones an, den die ganze Saite angeben würde. Das Dämpfen der Saite in der Mitte durch die leichte Berührung mit der Feder genügte schon, um sie in zwei schwingende Theile zu zerlegen. Ich brauche auch die Feder nicht während des Versuches ununterbrochen dort zu halten; wenn ich mit dem Bogen gestrichen habe, kann ich die Feder fortnehmen, die Saite schwingt weiter und giebt denselben Ton, wie vorher, an. Das Verhalten der Saite ist hier dem unserer gespannten Kautschukröhre ganz analog, als ich sie vorher in ihrem Mittelpunkte durch Umschliessen mit dem Zeigefinger und Daumen dämpfte [Fig. 39 (1)]. Nicht nur die seitwärts gezogene untere Hälfte, sondern auch die obere gerieth in Schwingungen. Wir können in der That mit der schwingenden Saite

jedes Mal die gleichen Erscheinungen hervorrufen, wie mit der Röhre. Es ist dies indess ein so wichtiger Punkt, dass ich ihn durch Versuche näher erläutern muss.

Um Ihnen zu beweisen, dass, wenn ich die Mitte der Saite berühre und mit meinem Bogen über die eine ihrer Hälften streiche, auch die andere Hälfte schwingt, lege ich auf die Mitte der unberührten Hälfte einen kleinen Reiter von rothem Papier. Ich dämpfe die Mitte und streiche mit dem Bogen; die Saite erzittert, und der Reiter wird abgeworfen (Fig. 41).

Fig. 41.

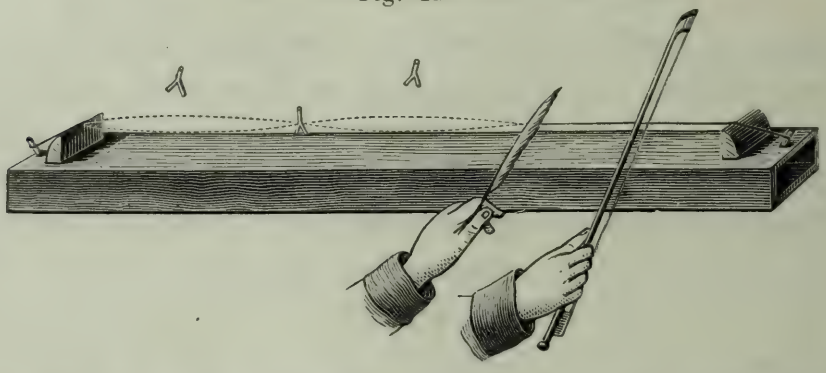


Wenn die Saite an einer Stelle gedämpft wird, die einem Drittel ihrer Länge entspricht, und streicht man dann mit dem Bogen über den kürzeren Theil, so kommt nicht nur dieser Theil in Schwingungen, sondern auch der grössere theilt sich in zwei Bäuche, die durch einen Knoten von einander getrennt sind. Zum Beweise setze ich kleine Reiter von rothem Papier auf die Bäuche und einen Reiter von blauem Papier auf den Knoten. Streiche ich mit dem Bogen über den kurzen Theil, so beobachten Sie ein Schwanken der rothen Reiter, und jetzt sind sie vollkommen abgeworfen, während der blaue Reiter auf dem Knoten ruhig sitzen bleibt (Fig. 42 a. f. S.).

Wenn die Saite an einem Viertel ihrer Länge gedämpft und der Bogen über den kürzeren Theil geführt

wird, so werden jetzt die übrigen drei Viertel sich in drei, durch zwei Knoten von einander getrennte Bäuche theilen. Ich beweise die Behauptung dadurch, dass

Fig. 42.



die drei auf den Bäuchen sitzenden Reiter abgeworfen werden, während die zwei auf den Knoten ungestört sitzen (Fig. 43).

Endlich dämpfe ich die Saite an dem Ende eines Fünftels ihrer Länge und setze, wie vorher, die rothen Reiter auf die Bäuche, die blauen auf die Knoten; durch einen einzigen Bogenstrich werfe ich die vier rothen Reiter ab, während die drei blauen ungestört bleiben (Fig. 44). So führen wir mit einer tönenden Saite dieselbe Reihe von Versuchen aus, wie vorher mit einer gespannten Kautschukröhre; in beiden Fällen sind die Versuche mit einander identisch [1]).

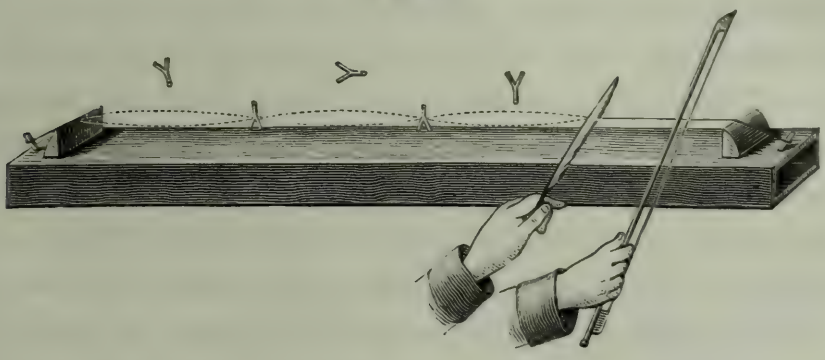
Um Ihnen diese Uebereinstimmung noch augenscheinlicher zu machen, habe ich hinter dem Tisch von einer Seite des Zimmers zur anderen einen starken Stahldraht von 9 m Länge ausgespannt. Ich nehme den

---

[1]) Chladni bemerkt (Akustik S. 55), dass man gewöhnlich Sauveur im Jahre 1701 die Entdeckung der Schwingungsarten zuschriebe, die den höheren Tönen der Saiten entsprächen; dass aber Noble und Pigott die Erscheinung im Jahre 1676 in Oxford entdeckt hätten, und dass Sauveur die Ehre der Entdeckung ablehnte, als er fand, dass Andere vor ihm die Beobachtung gemacht hätten.

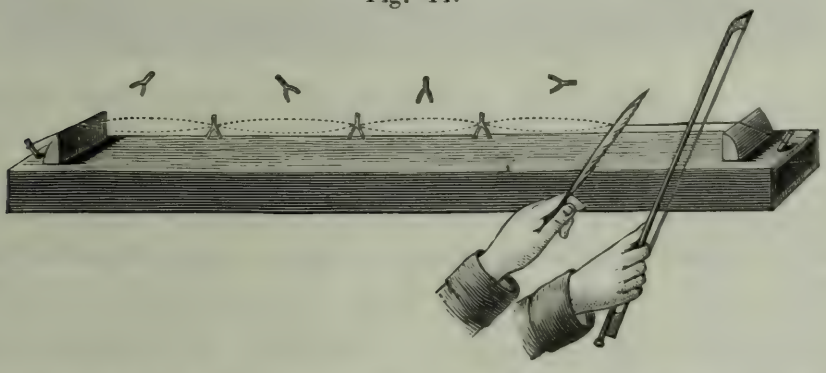
Mittelpunkt dieses Drahtes zwischen meinen Zeigefinger und Daumen und lasse meinen Assistenten die eine Hälfte seitwärts ziehen. Sie schwingt, und die der

Fig. 43.



anderen Hälfte mitgetheilten Schwingungen reichen hin, um ein grosses, über den Draht gelegtes Stück Papier in die Luft zu schleudern. Mit diesem langen Draht und mit Reitern, die nicht nur 0,8 qcm, sondern 200, 250, 300 qcm Oberfläche haben, kann ich alle die Versuche wiederholen, die Sie vorher mit der tönenden Saite gesehen haben. Die über die Knoten gelegten

Fig. 44.



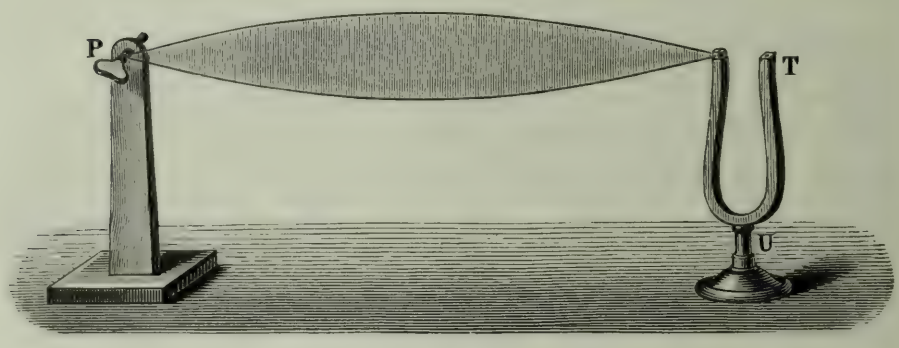
Papierstücke bleiben immer an ihrem Platz, während die auf den Bäuchen sitzenden in die Luft geworfen werden, sobald der kürzere Theil des Drahtes in Bewegung gesetzt wird. Aus unmittelbarer Nähe können Sie sogar in diesem Falle die Theilung des Drahtes sehen.

§. 7. Melde's Versuche.

Es wird Sie interessiren, wenn ich Ihnen jetzt einige neuere Versuche mit schwingenden Drähten zeige, die für das Auge eine Schönheit und Zartheit entwickeln, die Alles, was unser Monochord jemals leisten konnte, weit übertrifft. Wir verdanken Herrn Melde in Marburg diese neue Methode, die Schwingungen der Saiten zu zeigen. Der Maassstab der Versuche soll hier, entsprechend unseren Verhältnissen, abgeändert werden.

Sie sehen hier eine grosse Stimmgabel *T* (Fig. 45); an dem Ende einer ihrer Zinken ist eine Schraube be-

Fig. 45.



festigt, durch welche ein Seidenfaden fest an die Zinke angeklemmt werden kann. Von der Gabel geht der Faden um einen entfernten Wirbel *P*, durch den er beliebig stark gespannt werden kann. Ich streiche die Gabel mit meinem Bogen; ein unregelmässiges Zittern des Fadens ist die einzige Wirkung. Ich spanne ihn jetzt fester, und sowie ich die richtige Spannung erreicht habe, breitet er sich sogleich zu einer schönen zarten, 2 m langen Spindel aus, die an ihrer breitesten Stelle mehr als 15 cm breit ist und mit perlartigem Glanz leuchtet. Die spannende Kraft ist im Augenblick

eine solche, dass der Faden als ein Ganzes hin und her schwingt, während seine Schwingungen in einer verticalen Ebene vollführt werden.

Ich vermindere jetzt die Spannung des Fadens. Wenn ich die geeignete Spannung erreicht habe, theilt er sich plötzlich in zwei Bäuche, die durch einen scharf gezeichneten und scheinbar unbeweglichen Knoten von einander getrennt sind.

Während die Gabel fortfährt zu schwingen, lasse ich die Spannung noch mehr sinken; der Faden zerlegt sich jetzt in drei schwingende Theile. Wird er noch schlaffer, so zerlegt er sich in vier schwingende Theile. Und so könnte ich fortfahren und den Faden in 10, ja selbst in 20 Bäuche theilen, die von einander durch die entsprechende Zahl von Knoten getrennt sind.

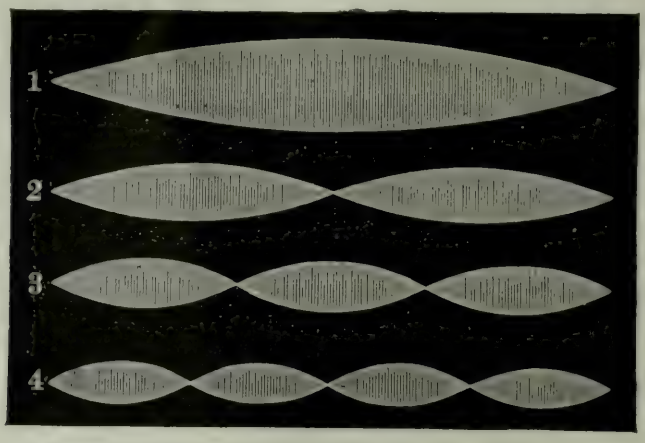
Schwingen weissseidene Fäden auf diese Art, so erscheinen die Knoten vollkommen fest, während die Bäuche Spindeln von der zartesten Schönheit bilden; jede hervorragende Stelle an dem gedrehten Faden verzeichnet überdies ihre Bewegung in einer mehr oder weniger leuchtenden Linie auf der Oberfläche der luftigen Spindel. Die vier eben beschriebenen Schwingungsarten sind in Fig. 46 (a. f. S.) 1, 2, 3, 4 abgebildet [1]).

---

[1]) Der erste Versuch wurde in der Vorlesung mit einem, in Form einer Stimmgabel gebogenen, auf einem schweren Ständer aufgestellten Stahlstab von $1^2/_3$ m Länge, 3,7 cm Breite und 1,3 cm Dicke angestellt. Die Zinken dieser Gabel waren 5 cm von einander entfernt. Die an ihnen befestigte Schnur war 3 m lang und 0,6 cm dick. Die Zinken wurden in Schwingungen versetzt, indem man sie schnell mit zwei überpolsterten Stücken Blei, von denen man jedes in einer Hand hielt, schlug. Die Zinken schwangen transversal gegen die Schnur. Die Schwingungen durch einen einzigen Schlag genügten, um die Schnur durch verschiedene Unterabtheilungen hindurch und wieder zu einem einzigen Bauche zurückzuführen; d. h., wenn man gegen die Zinken schlug und die Schnur dann als Ganzes schwang, so konnte man sie durch Verminderung der Span-

Schwingt der Faden und die Stimmgabel ganz gleichzeitig, so sind die Schwingungen des Fadens ruhig und lang andauernd. Eine kleine Abweichung von der

Fig. 46.



Gleichzeitigkeit erzeugt sogleich Unruhe und wenn sich auch die Bäuche für kurze Zeit zeigen mögen, so verschwinden sie doch sehr schnell.

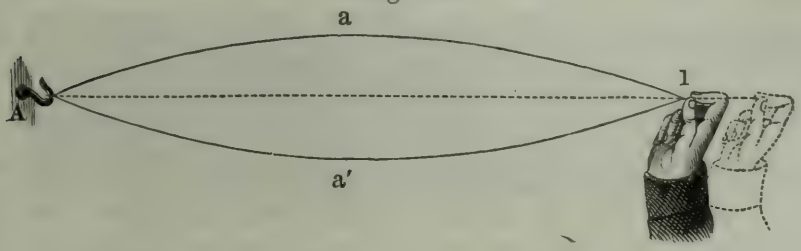
Bei den angestellten Versuchen schwingt die Gabel in der Richtung der Länge der Schnur. Jeder vorwärts gehende Stoss der Gabel erzeugt eine Ausbiegung, die bis an das befestigte Ende der Schnur läuft und dort reflectirt wird, so dass, wenn die longitudinalen Anstösse rechtzeitig erfolgen, sie eine transversale Schwingung hervorrufen. Betrachten wir dies genauer.

---

nung in zwei, drei oder vier schwingende Theile zerlegen, und darauf durch Vermehrung der Spannung wieder durch vier, drei und zwei Theile zu einem zurückkehren lassen, ohne dass man die Zinken von Neuem anzuschlagen brauchte. Die Schnur war so gewählt, dass statt in derselben Ebene hin und her zu schwingen, ihre Punkte Kreise beschrieben. Daher waren die Bäuche nicht mehr Ebenen, sondern Umdrehungsflächen und wurden von allen Theilen des Zimmers aus gleich gut gesehen. Die bei den folgenden Versuchen benutzten Stimmgabeln wurden für mich von dem vortrefflichen Akustiker König in Paris angefertigt; es waren dieselben, die gewöhnlich bei der Projection der Lissajous'schen Versuche verwendet werden.

Das eine Ende dieser schweren Schnur ist an einem Haken *A* (Fig. 47) befestigt, der in die Wand eingelassen

Fig. 47.



ist; ich ergreife das andere Ende mit meiner Hand, spanne die Schnur horizontal und bewege meine Hand in der Richtung der Schnur hin und her. Sie schwingt als Ganzes und Sie können beobachten, dass jedesmal, wenn die Schnur die Grenze ihrer Ausschwingung erreicht hat, meine Hand am meisten vorwärts gegangen ist. Wenn sie in einer verticalen Ebene schwingt, so muss meine Hand, um die Anstösse richtig einzutheilen, in dem Augenblick am weitesten bis *l* vorwärts gegangen sein, wo die Schnur die obere Grenze *a* erreicht, und ebenso in dem Augenblick, wo sie die untere Grenze *a'* ihrer Ausschwingung erreicht. Etwas Nachdenken macht es klar, dass meine Hand hierzu eine ganze Schwingung machen muss, während die Schnur nur eine halbe Schwingung macht; oder die Schwingungen meiner Hand müssen noch einmal so schnell erfolgen, als die der Schnur.

Genau dasselbe gilt für unsere Stimmgabel. Schwingt die Gabel in der Richtung der Schnur, so beträgt die Zahl der ganzen von ihr gemachten Schwingungen das doppelte von denen der Schnur. Und wenn bei richtiger Einstellung eine Gabel und eine Saite genügend schnell schwingen, um musikalische Töne zu erzeugen, so wird der Ton der Gabel eine Octave höher sein, als der der Saite.

Wird aber die Hand, statt in der Richtung der schweren Schnur hin und her bewegt zu werden, in rechten Winkeln gegen diese Richtung bewegt, so muss jede Bewegung der Hand aufwärts mit der Bewegung der Schnur aufwärts übereinstimmen; jede Bewegung der Hand abwärts mit jeder Bewegung der Schnur abwärts. Die Schwingungen der Hand und der Schnur sind in der That in diesem Falle vollkommen gleichzeitig; und wenn die Hand einen musikalischen Ton von sich geben könnte, so würde die Schnur einen Ton von derselben Höhe geben. Dies trifft auch zu, wenn man statt der schwingenden Hand eine schwingende Gabel nimmt.

Schwingt daher die Schnur als Ganzes, während die Schwingungen der Gabel in der Richtung ihrer Länge erfolgen, so wird sie sich dagegen in zwei Bäuche theilen, wenn die Schwingungen auf ihrer Längsrichtung senkrecht stehen; oder, allgemeiner gesagt, bei constanter Spannung werden wir immer, welches auch die Anzahl der Bäuche sei, die die Gabel erzeugte, wenn ihre Schwingungen in der Richtung der Schnur erfolgten, doppelt so viel Schwingungen haben, wie wenn dieselben die Schnur kreuzen. Hier ist z. B. eine Schnur AB (Fig. 48 und Fig. 49), die über eine Rolle B geht und durch ein bestimmtes (in der Zeichnung nicht angegebenes)

Fig. 48.

Gewicht gespannt wird. Schwingt die Stimmgabel ihrer Länge nach, wie in Fig. 48, so theilt sich die Schnur

in zwei gleiche Bäuche. Drehe ich die Gabel so, dass sie im rechten Winkel zur Schnur schwingt (Fig. 49),

Fig. 49.

so sind jetzt vier Bäuche oder doppelt so viel als vorher vorhanden. Befestige ich zwei Schnüre von gleicher Länge an derselben Gabel, die eine der Richtung der Schwingungen parallel, die andere auf derselben senkrecht, und spanne beide durch gleiche Gewichte, so wird, wenn die Gabel schwingt, die eine Schnur sich in doppelt so viel Bäuche theilen, wie die andere.

Es lassen sich viele schöne Versuche mit diesen schwingenden Schnüren machen. Den Weg, den ihre einzelnen Punkte beschreiben, kann man nach Angabe von Dr. Young verfolgen, wenn man diese Punkte erleuchtet und die von ihnen beschriebene Lichtlinie beobachtet. Sehr gut lässt es sich an einer Spiralfeder aus flachem polirten Silberdraht zeigen, von der das Licht in regelmässigen Intervallen ausstrahlt, wenn sie beleuchtet wird. Ist die Schwingung regelmässig, so beschreiben ihre leuchtenden Punkte gerade Linien von sonnengleichem Glanze. Spanne ich den Draht etwas weniger, aber nicht so stark, um die nächste Untertheilung zu erzeugen, so lagert sich über die stärkere Bewegung des Drahtes eine Zahl kleinerer Bewegungen, deren Vereinigung wunderbare und unbeschreiblich glänzende Erscheinungen hervorruft.

Als ich über die beste Art und Weise nachdachte, diese schönen Erscheinungen sichtbar zu machen, kam

ich auf den Gedanken, einen dünnen Platindraht, der durch den elektrischen Strom rothglühend gemacht worden war, zu benutzen. Solch ein Draht zieht sich jetzt von dieser Stimmgabel aus über einen kupfernen Steg und geht dann um einen Stift. Der kupferne Steg einerseits und die Stimmgabel andererseits sind mit den Polen einer galvanischen Kette verbunden, von der ein Strom durch den Draht geht und ihn zum Glühen bringt. Ich streiche mit dem Bogen über die Gabel, der Draht schwingt als Ganzes; seine beiden Enden leuchten, während seine Mitte dunkel ist, da sie bei seiner schnellen Bewegung durch die Luft abgekühlt wird. So sehen Sie eine Abschattirung der Rothgluth von den Enden zur Mitte des Drahtes. Ich vermindere die Spannung, der Draht theilt sich jetzt in zwei Bäuche; ich lasse weiter nach und habe drei; noch weiter, und jetzt theilt sich der Draht in vier Bäuche, die durch diese drei glänzenden Knoten von einander getrennt sind. Rechts und links von jedem Knoten schattirt sich die Rothglühhitze ab, bis sie verschwindet. Sie beobachten auch, dass, wenn der Draht in regelmässige Schwingungen kommt, die Knoten mit grösserem Glanze leuchten, als vorher der Draht, ehe die Schwingungen begannen. Der Grund ist folgender. Die Elektricität geht leichter durch einen kalten Draht als durch einen heissen. Wenn daher die schwingenden Theilchen durch ihren schnellen Durchgang durch die Luft abgekühlt werden, so nimmt ihre Leitungsfähigkeit zu; es geht mehr Elektricität durch den schwingenden, als durch den ruhenden Draht, und daher kommt die grössere Helligkeit der Knoten. Ist vor der Bewegung der Gabel der Draht rothglühend, so können seine Knoten, wenn er schwingt, sich bis zum Schmelzpunkt erhitzen.

§. 8. Neue Methode, um die Schwingungsgesetze zu bestimmen.

Wir können die Versuche des Herrn Melde so ausdehnen, dass sie uns die Bestimmung aller Gesetze der schwingenden Saiten gewähren. Hier sind vier Stimmgabeln a, b, c, d, deren Schwingungszahlen sich zu einander wie 1, 2, 4, 8 verhalten. Ich befestige eine Schnur an der längsten Gabel a, und spanne sie durch ein solches Gewicht, dass sie als Ganzes schwingt. Bestimme ich mit gleichem, spannendem Gewicht die Längen einer Schnur von derselben Beschaffenheit, wie die zuerst benutzte, welche, an die drei anderen Gabeln b, c, d befestigt, als Ganzes schwingen, so verhalten sich die Längen in den vier entsprechenden Fällen wie die Zahlen 8, 4, 2, 1.

Hieraus folgt das erste nach einer anderen Methode schon bewiesene Schwingungsgesetz: Die Länge der Schnur ist der Zahl der Schwingungen umgekehrt proportional[1]).

In diesem Falle schwingt die längste Schnur als Ganzes, wenn sie an der Gabel a befestigt wird. Ich befestige sie jetzt an b, spanne sie aber durch das gleiche Gewicht. Sie schwingt auch, wenn b schwingt, theilt sich aber in zwei gleiche Bäuche. Nur so kann sie sich den schnelleren Schwingungen von b anpassen. An c befestigt, zerlegt sich dieselbe Schnur in vier, an d befestigt, in acht Bäuche. Die Zahl der Bäuche ist

[1]) Wird eine Schnur mit einer Lösung von schwefelsaurem Chinin getränkt und durch die violetten Strahlen des elektrischen Lichtes beleuchtet, so zeigt sie glänzende Fluorescenz. Schwingt die Gabel, an der sie befestigt ist, so theilt sich die Schnur in eine Reihe von Spindeln, welche von einander durch glänzendere leuchtende Knoten getrennt sind, die ein Licht vom zartesten Blaugrün ausstrahlen.

der Zahl der Schwingungen proportional. Augenscheinlich haben wir hier in vollkommenerer Form dasselbe Resultat, das wir schon bei der, durch die Hand in Bewegung gesetzten Kautschukröhre beobachteten. Klar ist auch, dass dieses Resultat aus unserem ersten Gesetze theoretisch abgeleitet werden kann.

Wir können den Versuch weiter ausdehnen. Hier sind zwei Stimmgabeln, die von einander durch das musikalische Intervall, die Quinte genannt, getrennt sind. Ich befestige eine Schnur an eine der Gabeln und spanne sie, bis sie sich in zwei Bäuche theilt; wird sie an der anderen Gabel befestigt und durch dasselbe Gewicht gespannt, so theilt sie sich augenblicklich, sowie die Gabel in Schwingungen versetzt wird, in drei Bäuche. Um nun das Intervall einer Quinte herzustellen, müssen sich die Schwingungen der einen Gabel zu denen der anderen wie 2 : 3 verhalten. Die Theilung der Schnur zeigt das Intervall an. So kann die Theilung der Schnur bei Benutzung aller anderen musikalischen Intervalle erklärt werden [1]).

Hier sind ferner zwei Stimmgabeln a und b, von denen die eine (a) doppelt so oft als die andere schwingt. Ich befestige diese seidene Schnur an a und spanne sie, bis sie mit der Gabel gleichzeitig und als Ganzes schwingt. Ich mache nun eine zweite Schnur von derselben Länge, indem ich vier Fäden der ersten an einander lege. Ich befestige diese zusammengesetzte Schnur an b, behalte dieselbe Spannung wie beim letzten Versuch bei und versetze b in Schwingungen. Die zusammengesetzte Schnur stimmt mit b überein und

[1]) Die musikalischen Intervalle werden in einer späteren Vorlesung genauer besprochen werden.

schwingt als Ganzes. Wenn ich also, da die Gabel *b* halb so oft wie *a* schwingt, das Gewicht der Schnur vervierfache, so halbire ich ihre Schwingungszahl. Auf dieselbe einfache Weise kann man zeigen, dass bei neunfacher Vermehrung des Gewichts der Schnur die Zahl der Schwingungen auf ein Drittel vermindert werden kann. Wir sprechen das Gesetz folgendermaassen aus:

Die Zahl der Schwingungen ist der Quadratwurzel aus dem Gewichte der Schnur umgekehrt proportional.

Eine lehrreiche Bestätigung dieses Gesetzes erhalten wir folgendermaassen: An dieser Stimmgabel ist eine Seidenschnur von 2 m Länge befestigt. $^2/_3$ m der Schnur bestehen aus vier neben einander liegenden Fäden, die übrigen $1^1/_3$ m sind ein einzelner Faden. Ich verwende eine Spannung, bei der die Schnur in zwei Bäuche zerfällt. Wo theilt sie sich aber? Nicht in der Mitte, wie es der Fall war, als die Schnur durchweg von gleicher Dicke war, sondern an dem Punkt, wo die dicke Schnur aufhört. Der dicke Theil von $^2/_3$ m Länge schwingt jetzt ebenso, wie der dünne von $1^1/_3$ m Länge, ein Resultat, das sich als unmittelbare Folgerung aus den beiden schon festgestellten Gesetzen ergiebt.

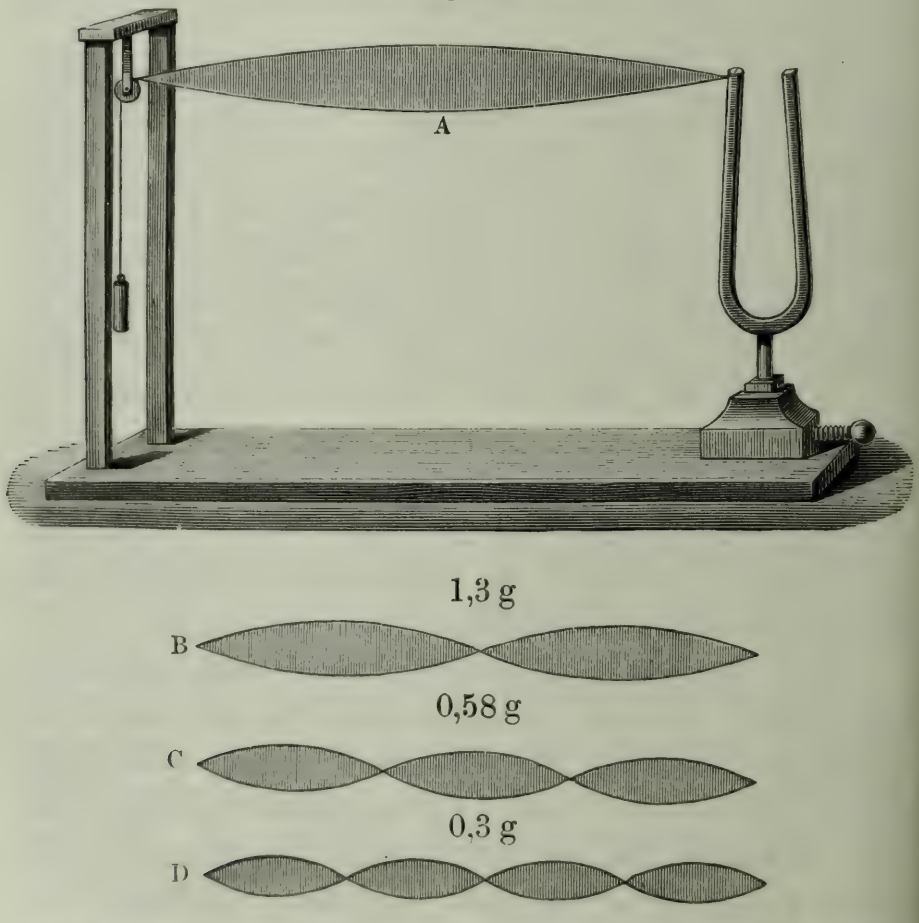
Hier sind wieder zwei Schnüre von derselben Länge und Dicke. Die eine ist an der Gabel *a*, die andere an der Gabel *b* befestigt, die doppelt so oft wie *a* schwingt. Durch ein Gewicht von 1,3 g gespannt, schwingt die an *b* befestigte Schnur als Ganzes. Nehmen wir die Gabel *a* statt *b*, so bedürfen wir eines Gewichtes von 5,2 g, damit die Schnur als Ganzes schwingt. Wir müssen also, um die Zahl der Schwingungen zu verdoppeln, das spannende Gewicht vervierfachen. Es kann ebenso

bewiesen werden, dass wir, um die Zahl der Schwingungen zu verdreifachen, das spannende Gewicht verneunfachen müssen. Daraus folgt:

Die Zahl der Schwingungen ist der Quadratwurzel der Spannung proportional.

Ich will den Versuch ändern. Diese seidene Schnur wird von der Stimmgabel über die Rolle gezogen und durch ein Gewicht von 5,2 g gespannt. Die Schnur schwingt als Ganzes wie bei *A* (Fig. 50). Wird das

Fig. 50.



Gewicht vermindert, so lässt die Spannung der Schnur nach, die sich endlich in zwei Bäuche wie bei *B* (Fig. 50) theilt. Welches ist nun das spannende Gewicht? 1,3 g,

der vierte Theil des ersten. Durch ein spannendes Gewicht von fast genau 0,58 g theilt sie sich, wie bei *C*, in drei Bäuche und durch ein spannendes Gewicht von 0,3 g in vier Bäuche, wie bei *D*. So verdoppelt die viertel Spannung, verdreifacht die neuntel Spannung, vervierfacht die sechszehntel Spannung die Zahl der Bäuche. Allgemein ausgedrückt ist also die Zahl der Bäuche der Quadratwurzel der Spannung umgekehrt proportional. Dieses Resultat kann durch Schlussfolgerungen aus den vorher gegebenen Gesetzen abgeleitet werden, und seine Bestätigung durch den Versuch zeugt für deren Richtigkeit.

So kommen wir durch eine Reihe von Schlussfolgerungen und Versuchen, die von den früheren ganz verschieden sind, zu denselben Gesetzen. Oft führen in der Wissenschaft verschiedene Wege zu derselben Wahrheit, und verfolgen wir sie nur gewissenhaft, so können wir überzeugt sein, dass wir zuletzt die Wahrheit erreichen. Wir gelangen oft zu einem Widerspruch bei unseren Schlussfolgerungen; prüfen wir sie aber noch einmal, so finden wir sicherlich, dass der Widerspruch nicht in dem Mangel an Gesetzmässigkeit in der Natur, sondern in dem Mangel an Sorgfalt im Menschen gelegen hat.

Harmonische Töne oder Obertöne.

§. 9. Klangfarbe.

Wir kommen jetzt zu einem Theil unserer Aufgabe, der sich in der Folge als besonders wichtig herausstellen wird. Durch die verschiedensten Versuche habe ich ge-

zeigt, dass eine gespannte Saite entweder als Ganzes schwingen, oder sich in eine Anzahl gleicher Theile theilen kann, von denen jeder wie eine unabhängige Saite schwingt. Nun ist es aber so gut wie unmöglich, dass eine Saite als Ganzes tönen kann, ohne zu gleicher Zeit eine kleinere oder grössere Theilung zu erfahren, d. h. es lagern sich immer über die Schwingungen der ganzen Saite mehr oder weniger die Schwingungen ihrer aliquoten Theile. Die durch diese letzteren Schwingungen erzeugten höheren Töne werden die harmonischen Töne der Saite genannt. Ebenso verhält es sich mit anderen tönenden Körpern; wir beobachten immer gleichzeitig verschiedene Schwingungen. Es mischen sich höhere Töne mit dem Grundton, und ihre Mischung bestimmt das, was wir im Englischen quality nennen. Die Franzosen nennen es timbre, die Deutschen Klangfarbe[1]). Vermöge dieser Mischung von hohen und tiefen Tönen können wir ein musikalisches Instrument von dem anderen unterscheiden. Eine Clarinette und eine Violine z. B. können, obgleich sie auf denselben Grundton abgestimmt sind, doch nicht mit einander verwechselt werden; die Nebentöne der einen sind verschieden von denen der anderen, und da sich diese letzteren Töne mit den Grundtönen der beiden Instrumente vereinen, so erscheint der Klang nicht identisch.

Alle Körper und Instrumente, durch welche man musikalische Töne erzeugt, geben also ausser ihren Grundtönen auch Töne, die einer höheren Ordnung von Schwingungen angehören. Die Deutschen fassen

---

[1]) „Diese Eigenschaft des Tones, bisweilen sein Register, Farbe oder timbre genannt.“ Thomas Young, Essay über Musik.

alle diese Töne unter dem allgemeinen Namen Obertöne zusammen. Ich glaube, es würde zweckmässig sein, wenn man auch im Englischen den Ausdruck Overtones als gleichbedeutend mit dem deutschen Worte anwendete. Man könnte die deutsche Sprache um ihre Gewandtheit beneiden, mit der sie sich den Erfordernissen der Natur anzupassen weiss. Der Ausdruck Klangfarbe z. B., den auch Helmholtz benutzt, ist ausserordentlich bezeichnend, und wir haben keinen gleichwerthigen im Englischen. Sie wissen, dass die Farbe von der Zahl der Schwingungen abhängt, dass blaues Licht in demselben Verhältniss zum rothen steht, wie ein hoher Ton zu einem tiefen. Eine einfache Farbe hat nur eine Schwingungszahl und sie kann dem einfachen Ton in der Musik analog angesehen werden. Ein Ton kann also als das Resultat einer Schwingung erklärt werden, die in keine einfacheren zerlegt werden kann. Eine gemischte Farbe dagegen entsteht durch die Mischung von zwei oder mehreren verschiedenen, und eine Tonmasse, wie wir sie erhalten, wenn der Grundton und die harmonischen Töne einer Saite zusammenklingen, nennen die Deutschen einen Klang. Könnten wir nicht im Englischen das Wort clang brauchen, um dieselbe Sache zu bezeichnen, und so dem Ausdruck eine bestimmte wissenschaftliche Bedeutung geben, die der populären verwandt wäre; und könnten wir nicht, wie Helmholtz, das Wort colour oder tint hinzusetzen, um den Charakter des Klanges zu bezeichnen, und so den Ausdruck clang-tint als gleichbedeutend mit Klangfarbe anwenden?

So werde ich denn von jetzt ab mit Ihrer Erlaubniss diese Ausdrücke brauchen, und wir müssen nun, etwas genauer als wir es bisher gethan, die Unterabtheilung

einer Saite in ihre harmonischen Theile betrachten. Unser Monochord mit seinem gespannten Draht steht vor Ihnen. Die Scala des Instrumentes ist in 100 gleiche Theile getheilt. An dem Mittelpunkte unseres Drahtes steht die Zahl 50; an einem Punkte, der fast genau ein Drittel vom Ende entfernt ist, steht die Zahl 33, während in Entfernungen, die ein Viertel und ein Fünftel seiner Länge von seinem Ende betragen, die entsprechenden Zahlen 25 und 20 stehen. Diese Zahlen genügen für unsere jetzige Absicht. Ich schnelle den Draht bei 50; Sie hören seinen Klang hohl und dumpf. Ich schnelle ihn bei 33, der Klang hat sich geändert. Ich schnelle ihn bei 25, und der Klang ist wiederum von den beiden früheren verschieden. So wie ich mich von der Mitte des Drahtes entferne, wird die Klangfarbe voller, der Ton lebhafter und schärfer. Worin liegt nun die Ursache dieser Verschiedenheiten beim Tönen desselben Drahtes?

Der berühmte Thomas Young, einstmals Professor an der Royal Institution, lehrte uns, wie wir diese Frage lösen können. Er bewies, dass, wenn ein Punkt einer Saite geschnellt wird, alle höheren Töne, die diesen Punkt als Knoten haben, aus dem Klang verschwinden. Ich will dies durch einen Versuch erklären. Ich schnelle den Punkt 50 und lasse die Saite tönen. Und jetzt kann ich beobachten, dass der erste Oberton, der einer Theilung der Saite in zwei schwingende Theile entspricht, aus dem Klang entfernt ist. Wäre er vorhanden, so könnte das Berühren des Punktes 50 ihn nicht stören, denn dieser Punkt würde für ihn ein Knoten sein. Aber indem ich den Punkt 50 dämpfe, wird der Grundton vernichtet, und man hört keine höhere Octave dieses Tones. Mit der Octave verschwindet die ganze Reihe

von Obertönen, deren Schwingungszahlen das Vier-, Sechs-, Achtfache (gerade Vielfache) von der Schwingungszahl des Grundtones sind. Alle diese Töne beanspruchen in der Mitte einen Knoten, wo er nach dem Gesetz von Young sich nicht bilden kann. Ich schnelle jetzt einen anderen Punkt, z. B. 25, und dämpfe 50 wie vorher. Der Grundton ist verschwunden, aber seine Octave klingt voll und rein in Ihr Ohr. Da der Punkt 50 dies Mal nicht geschnellt worden ist, so kann sich dort ein Knoten bilden; er hat sich gebildet und die beiden Hälften des Drahtes schwingen fort, nachdem die Schwingungen des Drahtes als Ganzes aufgehoben worden sind. Ich schnelle jetzt den Punkt 33, und der zweite harmonische oder Oberton fehlt im Klange. Ich beweise es, indem ich den Punkt 33 dämpfe. Wäre der zweite harmonische Ton vorhanden, so würde dies ihn nicht stören; denn 33 ist sein Knoten. Der Grundton ist verschwunden, wir hören aber keinen Ton, der der Theilung des Drahtes in drei schwingende Theile entspricht. Der Ton wird nicht gehört, da er nie existirte.

Alle Obertöne, die von dieser Theilung abhängen, deren Schwingungszahl die sechsfache, neunfache, zwölffache des Grundtones ist, werden ebenfalls dem Klang entzogen. Ich schnelle jetzt 20 und dämpfe 33 wie vorher. Der zweite harmonische Ton ist nicht vernichtet, da er nach dem Aufhören des Grundtones klar und voll zu klingen fortfährt. Da in diesem Falle der Punkt 33 nicht geschnellt wird, so kann sich dort ein Knoten bilden, und die Saite kann sich demnach in drei Theile theilen. Ebenso wird, wenn ich 25 schnelle und darauf dämpfe, der dritte harmonische Ton nicht gehört; schnelle ich aber einen Punkt zwischen 25 und dem Ende des Drahtes und dämpfe dann 25, so wird der dritte harmo-

nische Ton deutlich gehört. Und so könnten wir fortfahren, denn die allgemeine Regel, die von Young ausgesprochen und die durch diese Versuche bewiesen worden ist, lautet, dass, wenn irgend ein Punkt einer Saite geschnellt oder geschlagen oder, wie Helmholtz hinzufügt, mit dem Bogen gestrichen wird, der harmonische Ton, der diesen Punkt als Knoten beansprucht, aus dem Gesammtklang der Saite verschwindet.

§. 10. Mischung der Obertöne mit Grundtönen. Die Aeolsharfe.

Alles dieses zeigt Ihnen, welch grossen Einfluss die secundären Schwingungen auf die Eigenschaften des Tones haben müssen, den die Saite ausgiebt. Die Töne, die so voll in Ihrem Ohre erklangen, als der Grundton zerstört war, mischten sich mit diesem Tone, ehe er vernichtet wurde. Es erscheint sonderbar, dass so laute Töne so vollständig von dem Grundton übertönt werden können, dass sie selbst das geschulte Ohr eines Musikers nicht von einander zu trennen vermag. Helmholtz hat nachgewiesen, dass dies nur dem Mangel an Uebung und Aufmerksamkeit zuzuschreiben sei. Das Talent des Musikers wurde in dieser Richtung nie geübt. Viele Wirkungen kann der Musiker unterscheiden, weil seine Kunst die Gewohnheit der Unterscheidung hier von ihm verlangt. Seine Kunst verlangt aber nicht von ihm, dass er den Klang eines Instrumentes in seine Bestandtheile zerlegt. Doch kann es selbst das ungeübte Ohr mit Aufmerksamkeit erreichen, besonders wenn der Geist vorher weiss, was das Ohr finden soll.

Dabei erinnere ich mich eines Vorfalles, der sich in diesem Zimmer beim Beginn meiner Bekanntschaft

mit Faraday zutrug. Ich wollte ihm eine eigenthümliche Wirkung eines Elektromagnets auf einen Krystall zeigen. Es war Alles dazu vorbereitet, als er gerade in dem Augenblick, ehe der Magnet erregt wurde, seine Hand auf meinen Arm legte und mich fragte: „Worauf soll ich achten?“ Inmitten der Fülle von Eindrücken, die mit einem Versuch verbunden sind, erkannte selbst dieser erste aller Experimentatoren, wie nöthig es wäre, dass er wüsste, auf welchen besonderen Punkt er seine Aufmerksamkeit lenken sollte. Und dies ist besonders da nothwendig, wo die Wirkungen so verwickelt und so innig mit einander verwoben sind, wie bei den zusammengesetzten Tönen eines Klanges. Wir können unserer Aufmerksamkeit nachhelfen, wenn wir irgend einen Ton zu isoliren wünschen, indem wir diesen Ton auf einer besonderen Saite schwach anklingen lassen. Hat das Ohr so den Ton kennen gelernt, so geht es leicht von ihm zu dem Ton von derselben Höhe im zusammengesetzten Klang über und trennt ihn leichter von seinen Gefährten. Bei den vorher angestellten Versuchen, wo es unsere Absicht war, jedes Mal den höheren Ton der Saite in all seiner Kraft hervortreten zu lassen, vernichteten wir den Grundton vollständig. Wir können ihn indess auch schwächen, ohne ihn zu vernichten. Ich schnelle diese Saite bei 33 und lege die Feder für einen Augenblick leicht auf die Saite bei 50. Dadurch schwäche ich den Grundton so sehr, dass man seine Octave deutlich hören kann. Berühre ich die Saite bei 50 noch einmal, so schwäche ich den Grundton noch mehr, so dass jetzt sein erster harmonischer Ton stärker ist, als er selbst. Sie hören beide Töne und hätten sie bei genügend angestrengter Aufmerksamkeit von Anfang an hören können.

Die harmonischen Töne einer Saite können innerhalb weiter Grenzen verstärkt oder geschwächt werden. Sie können, wie wir gesehen haben, von dem Grundton überdeckt werden und können ihn eben so wirksam decken. Ein Schlag mit einem harten Körper ist ihrer Entwickelung günstig, während ein Schlag mit einem weichen Körper derselben ungünstig ist. Sie hängen ausserdem noch von der Geschwindigkeit ab, mit welcher der die Saite schlagende Körper sich nach dem Schlage zurückzieht. So werden sie von dem Gewicht und der Elasticität der Hämmer im Piano beeinflusst. Sie hängen auch von der Stelle ab, die von dem Schlage getroffen wurde. Wenn die Saite z. B. in der Mitte angeschlagen wird, so sind ihre harmonischen Töne weniger stark, als wenn sie nahe am einen Ende getroffen wird.

Helmholtz, eben so gross als Mathematiker wie als Experimentator, hat die theoretische Intensität der auf verschiedene Art erzeugten harmonischen Töne berechnet, d. h. die wirkliche lebendige Kraft oder Energie der Schwingungen, unabhängig von ihrer Wirkung auf das Ohr. Ein einziges, von ihm gegebenes Beispiel mag genügen, um diesen Gegenstand zu erläutern. Nennen wir die Intensität des Grundtones 100, so ergiebt sich die des zweiten harmonischen Tones gleich 56,1, oder etwas grösser als die Hälfte, wenn man die Saite an einem Punkte, der um $^1/_7$ ihrer Länge von ihrem Ende entfernt ist, einfach nach der Seite zieht. Wurde die Saite von dem Hammer eines Claviers getroffen, dessen Berührung mit der Saite nur $^3/_7$ von der Schwingungszeit des Grundtones betrug, so war die Intensität dieses Tones 9. Hier war der zweite harmonische Ton fast ganz vernichtet. Wurde indess die Dauer der Berührung auf $^3/_{20}$ der Schwingungszeit des Grundtones vermindert,

so stieg die Intensität des harmonischen Tones auf 357; während, wenn die Saite mit einem sehr harten Hammer scharf angeschlagen wurde, die Intensität auf 505 stieg, oder auf mehr als das Fünffache des Grundtones [1]).

Die Verfertiger von Pianofortes haben gefunden, dass die lieblichsten Töne durch die mittleren Saiten ihrer Instrumente entstehen, wenn der Punkt, gegen den der Hammer schlägt, $^1/_7$ bis $^1/_9$ der Länge der Saite von ihrem Ende entfernt ist.

Woher mag dies kommen? Helmholtz hat darauf geantwortet. Bis zu den Tönen, bei denen sich an diesen Punkten Knoten bilden, sind alle Obertöne in Einklang mit den Grundtönen; die sechsten und achten Obertöne der Saiten besitzen indess diesen Einklang nicht mehr; sie sind Dissonanzen, und daher ist es wünschenswerth, sie zu beseitigen. Dies geschieht, wenn man auf den Punkt, wo sich für sie ein Knoten bilden würde, den Hammer fallen lässt. Dadurch wird die Möglichkeit ausgeschlossen, dass der Ton sich bildet und seine schädliche Wirkung wird vermieden.

Die Saiten der Aeolsharfe werden durch den Luftstrom, der über sie hingeht, in harmonische Theile getheilt. Das Instrument wird gewöhnlich in ein Fenster zwischen den Rahmen und Flügel gestellt, so dass die Luft über die Saiten streichen muss. Sir Charles Wheatstone empfiehlt eine erste Violinsaite unten an einer nicht gut schliessenden Thür auszuspannen. Ist die Thür geschlossen, so versetzt der unten eintretende Luftstrom die Saite in Schwingungen, und ist Feuer im Zimmer, so werden die Schwingungen so heftig, dass eine grosse Mannigfaltigkeit von Tönen gleichzeitig erzeugt wird [2]).

[1]) Lehre von den Tonempfindungen S. 135.

[2]) Eine solche Saite wirkt ebenso wie die Sirene. Die Saite unter-

Ein Baseler Herr construirte aus Eisendrähten ein grosses Instrument, das er Wetterharfe oder Riesenharfe nannte, und das, wie der Verfertiger behauptete, bei jeder Witterungsänderung tönte. Seine Töne sollten auch durch die Aenderungen des Erdmagnetismus hervorgerufen werden. Chladni bewies das Irrige dieser Ansicht und führte die Wirkung des Instrumentes auf den Wind zurück, der die Saiten bewegte.

§. 11. Young's optische Belege.

Zum Schluss müssen wir noch die Versuche von Dr. Young anführen, der zuerst optische Methoden zum Studium der Schwingungen von Saiten anwendete. Er liess einen Sonnenstrahl auf eine Claviersaite fallen und erhielt so einen glänzenden Punkt. Als er dann die Saite durch Anschlagen in Schwingungen versetzte, beschrieb der Punkt eine leuchtende Linie, wie die durch das Wirbeln einer brennenden Kohle in der Luft gebildete, und die Form dieser Linie entsprach der Art der Schwingungen. Es wurde durch diese Versuche gezeigt, dass die Schwingungen der Saite nicht auf eine einzige Ebene beschränkt sind, sondern dass sie in ihren Schwingungen mehr oder weniger complicirte Curven beschreibt. Ueber die Schwingungen der ganzen Saite legten sich partielle Schwingungen, die sich als Schleifen oder Schlangenlinien verriethen. Einige der von Dr. Young beobachteten Linien sind in Fig. 51 abgebildet. Jede dieser Abbildungen entspricht einem bestimmten Schwingungszustande, in den die Saite die umgebende

---

bricht den Strom der Luft. Ihre Wirkung gleicht auch der einer Pfeife. Siehe fünfte Vorlesung.

Luft versetzt. Die Gestalt der Schallwelle wird von diesen über einander gelagerten Schwingungen beeinflusst,

Fig. 51.

und so wirken sie auf die Klangfarbe oder Qualität des Schalls.

Uebersicht der dritten Vorlesung.

Die Quantität der Bewegung, die durch eine schwingende Saite der Luft mitgetheilt wird, ist zu gering, um selbst in der Nähe der Saite als Schall beobachtet werden zu können.

Wenn eine grosse Oberfläche in der Luft schwingt, bilden sich Verdichtungen und Verdünnungen leichter, als wenn der schwingende Körper von so kleinen Dimensionen wie eine Saite ist. Deshalb müssen die Saiten, wenn sie als Tonquellen benutzt werden sollen, mit Körpern von grösserer Oberfläche verbunden sein, die ihre Schwingungen aufnehmen und sie der umgebenden Luft mittheilen.

Daher hängt der Ton der Harfe, des Claviers, der Guitarre oder der Violine hauptsächlich von dem Resonanzboden des Instrumentes ab.

Die folgenden vier Gesetze beherrschen die Schwingungen der Saiten: Die Schwingungszahl ist der Länge umgekehrt proportional; sie ist dem Durchmesser umgekehrt proportional; sie ist der Quadratwurzel des spannenden Gewichts oder der Spannung direct proportional, und sie ist der Quadratwurzel der Dichtigkeit der Saite umgekehrt proportional.

Vergleicht man Saiten von derselben Länge und Spannung, aber von verschiedenen Durchmessern und Dichtigkeiten, so gilt das Gesetz, dass die Schwingungszahl der Quadratwurzel des Gewichts der Saite umgekehrt proportional ist.

Wird ein gespanntes Seil oder eine mit Sand gefüllte Kautschukröhre mit dem einen Ende an einem feststehenden

Gegenstande befestigt und erhält am anderen Ende einen Anstoss, so läuft die auf der Röhre erzeugte Erhöhung die Röhre wie ein Impuls bis zum befestigten Ende entlang, wird dort reflectirt und kehrt zu der Hand zurück, die den Anstoss gab.

Die Zeit, in der der Impuls von der Hand bis zum befestigten Ende der Röhre und wieder zurück läuft, ist dieselbe, welche die ganze Röhre zu einer ganzen Schwingung braucht.

Wird eine Reihe von Impulsen nach einander die Röhre entlang geschickt, so begegnen sich die directen und reflectirten Impulse und theilen bei ihrem Zusammentreffen die Röhre in eine Reihe von schwingenden Theilen, die man Bäuche nennt, und die von einander durch Punkte von scheinbarer Ruhe, Knoten genannt, getrennt sind.

Die Zahl der Bäuche ist der Schwingungszahl am freien Ende der Röhre direct proportional.

Die Hand, die diese Schwingungen erzeugt, braucht nur durch einen kleineren als $2^1/_2$ bis 3 cm grossen Raum bewegt zu werden, während die Summirung ihrer Impulse die Amplitude der Bäuche viel höher steigern kann.

Wird eine an beiden Enden befestigte Kautschukröhre in der Mitte vom Zeigefinger und Daumen umschlossen, so werden beide Hälften, wenn die eine von ihnen seitlich gezogen und wieder losgelassen wird, in Schwingungen versetzt.

Wird die Röhre an einem Punkte, der ein Drittel, ein Viertel oder ein Fünftel ihrer Länge von dem einen ihrer Enden entfernt ist, umschlossen, und zieht man dann den kürzeren Theil seitlich und lässt ihn wieder los, so theilt sich der längere Theil in zwei, drei oder vier schwingende Abschnitte, die durch Knoten von einander getrennt sind.

Die Zahl der schwingenden Theile hängt von der Schwingungszahl an dem Punkte ab, der vom Finger und Daumen umschlossen wird.

Auch hier kann die Amplitude der Schwingungen an dem vom Finger und vom Daumen umschlossenen Punkte

nur sehr wenige Centimeter betragen, während die Amplitude der Bäuche viel grösser werden kann.

Eine Claviersaite, die mit einer Feder an einem Punkte berührt wird, der um die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel, ein Fünftel u. s. f. der Länge der Saite von dem einen ihrer Enden entfernt ist, theilt sich, wenn der kürzere Theil bewegt wird, ebenso wie die Kautschukröhre. Die Theilung kann sichtbar gemacht werden, indem man kleine Papierreiter auf die Saite setzt. Die auf den Bäuchen sitzenden Reiter werden abgeworfen, die auf den Knoten sitzenden behalten ihre Plätze.

Die Töne, die der Theilung einer Saite in ihre aliquoten Theile entsprechen, nennt man die harmonischen Töne der Saite.

Schwingt eine Saite als Ganzes, so theilt sie sich gewöhnlich gleichzeitig in ihre aliquoten Theile. Kleinere Schwingungen liegen über den grösseren; die Töne, die diesen kleineren Schwingungen entsprechen und die wir Obertöne nennen wollen, mischen sich zu gleicher Zeit mit dem Grundton der Saite.

Die Hinzufügung dieser Obertöne zum Grundton bestimmt die Klangfarbe des Tones.

Der Hinzutritt dieser Obertöne zu denselben Grundtönen lässt uns den Ton der Clarinette von dem der Flöte und den der Violine von den beiden ersteren unterscheiden. Könnten die reinen Grundtöne dieser Instrumente isolirt werden, so würden sie nicht von einander zu unterscheiden sein; aber die Beimischung der verschiedenen Obertöne bei den verschiedenen Instrumenten macht ihre Klangfarbe verschieden, und man kann sie daher unterscheiden.

Statt der schweren Kautschukröhre bei den obigen Versuchen können wir dünne seidene Fäden verwenden, und statt der schwingenden Hand schwingende Stimmgabeln, und die Saiten als Ganzes schwingen oder sich in eine beliebige Zahl von Bäuchen theilen lassen. Wir können auf diese Weise sehr schöne Erfolge erzielen und durch derartige Versuche können wir alle Gesetze der schwingenden Saiten beweisen.

Wird eine gespannte Saite seitwärts gezogen oder wird sie mit einem Bogen gestrichen, so verschwinden alle Obertöne, für die der bewegte Punkt ein Knoten ist, aus dem Klang der Saite.

Der Punkt, den der Hammer des Claviers trifft, liegt um ein Siebentel bis ein Neuntel der Länge der Saite von ihrem Ende entfernt; schlägt man diesen Punkt an, so können die Töne, für die er ein Knoten ist, nicht erzeugt werden, und die Entstehung einer Dissonanz wird so vermieden.

Vierte Vorlesung.

Transversale Schwingungen eines an beiden Enden befestigten Stabes, seine Unterabtheilungen und die entsprechenden Obertöne. — Schwingungen eines an einem Ende befestigten Stabes. — Das Kaleidophon. — Die Eisenvioline und die Spieldose. — Schwingungen eines an beiden Enden freien Stabes. — Das Holzinstrument und die Glasharmonika. — Schwingungen einer Stimmgabel, ihre Unterabtheilungen und ihre Obertöne. — Schwingungen von quadratischen Platten. — Chladni's Entdeckungen. — Wheatstone's Analyse der Schwingungen der Platten. — Chladni's Figuren. — Schwingungen von Scheiben und Glocken. — Versuche von Faraday und Strehlke.

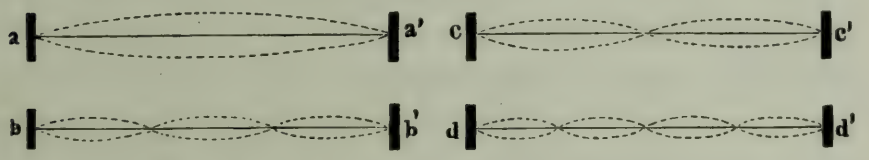
---

§. 1. Transversale Schwingungen eines an beiden Enden befestigten Stabes.

In unserer letzten Vorlesung haben wir die Transversalschwingungen der Saiten behandelt. Ich will mich in der heutigen Vorlesung mit den Transversalschwingungen von Stäben, Platten und Glocken beschäftigen und werde mit einem, an beiden Enden befestigten Stabe beginnen. Seine Schwingungsart ist dieselbe, wie die der Saite. Er schwingt als Ganzes und kann sich auch in zwei, drei, vier oder mehr schwingende Theile zerlegen. In Folge eines sogleich anzugebenden Grundes sind die Gesetze, die die Höhe der auf einander folgenden Töne beherrschen, in beiden Fällen vollkommen ver-

schieden. Wenn eine Saite in zwei gleichen Theilen schwingt, so schwingt jede der Hälften mit der doppelten Geschwindigkeit, wie die ganze, während beim Stab jede seiner Hälften fast mit dreifacher Geschwindigkeit wie der ganze schwingt. Bestimmter ausgesprochen ist das Verhältniss der beiden Schwingungszahlen wie 9 : 25, d. h. wie das Quadrat von 3 zu dem Quadrat von 5. In Fig. 52, *aa'*, *cc'*, *bb'*, *dd'*, habe ich die ersten vier Schwin-

Fig. 52.



gungsarten eines an beiden Enden befestigten Stabes gezeichnet; die auf einander folgenden Schwingungszahlen stehen in den vier Fällen in folgendem Verhältniss zu einander:

Zahl der Knoten	0	1	2	3
Zahl der Schwingungen	9	25	49	81

Die letzte Zahlenreihe enthält die Quadrate der ungeraden Zahlen 3, 5, 7, 9.

Bei der Saite wurden die Schwingungen durch eine von aussen kommende Spannung erhalten; beim Stabe werden die Schwingungen durch die Elasticität des Stabes selbst erhalten. Die Art der Theilung ist in beiden Fällen dieselbe, aber die dabei ins Spiel kommenden Kräfte sind verschieden und dem entsprechend auch die auf einander folgenden Schwingungszahlen.

§. 2. Transversale Schwingungen eines an einem Ende befestigten Stabes.

Wir gehen jetzt zu einem Stabe über, der an einem Ende befestigt, am anderen frei ist. Auch hier erhält

die Elasticität des Stoffes und nicht eine äussere Spannung die Schwingungen. Um wie gewöhnlich Tonschwingungen zunächst durch gröbere, mechanische zu erläutern, befestige ich diesen langen Eisenstab *no* (Fig. 53)

Fig. 53.

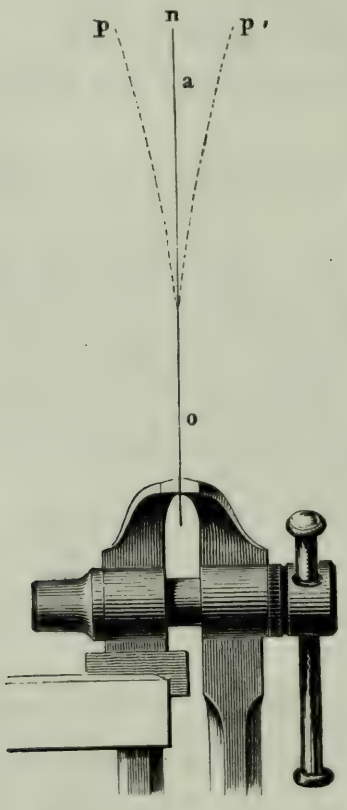
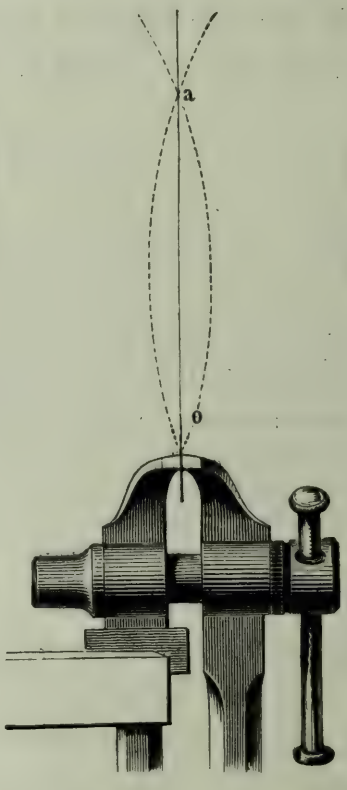


Fig. 54.

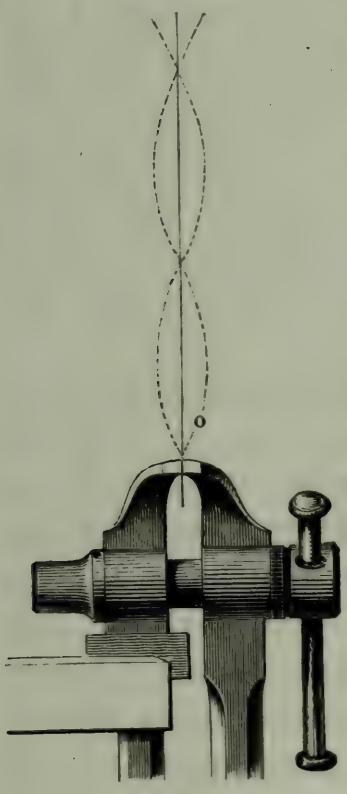


in einem Schraubstock, ziehe den Stab seitwärts und lasse ihn wieder los. Um seine Schwingungen deutlicher hervortreten zu lassen, werfe ich seinen Schatten auf einen Schirm. Er schwingt als Ganzes zwischen den Punkten *pp'* hin und her. Der Stab ist aber noch anderer Schwingungsarten fähig. Ich dämpfe ihn bei dem Punkte *a*, indem ich ihn dort leicht zwischen Zeigefinger und Daumen halte, und schlage ihn heftig zwischen *a* und *o*. Der Stab theilt sich in zwei schwingende Theile,

die durch einen Knoten (Fig. 54) von einander getrennt sind.

Sie sehen auf dem Schirm zwischen *a* und dem Schraubstock unten diesen spindelförmigen und über *a* diesen fächerartigen Schatten und den schwarzen Knoten zwischen beiden. Die Theilung kann auch geschehen, ohne dass man *a* dämpft, indem man dem Stab zwischen *a* und *o* einen plötzlichen starken Schlag giebt. Hier schwingt indess der Stab nicht nur in Theilen, sondern auch als Ganzes, die Theilschwingungen legen sich über die grosse Schwingung.

Fig. 55.



Sie werden ausserdem beobachten, dass die Amplitude der Theilschwingungen von der Plötzlichkeit meines Schlages abhängt. Erfolgt der Schlag langsam, so ist auch die Theilung des Stabes nur schwach ausgesprochen, während die ganze Schwingung sehr klar hervortritt. Ist aber der Schlag stark und schnell, so wird die ganze Schwingung schwach, aber die partiellen Schwingungen werden kräftig ausgeführt. Wären die Schwingungen dieses Stabes schnell genug, um einen musikalischen Ton zu geben, so würde die Schwingung des Stabes als Ganzes seinem Grundton entsprechen, während die Theilung des Stabes in zwei Abschnitte seinem ersten Oberton entspräche. Wenn nun noch ausserdem der Stab als Ganzes und als getheilter Stab zu gleicher Zeit schwingen würde,

so würde der Grundton gleichzeitig mit dem Oberton gehört werden. Wenn ich den richtigen Punkt dämpfe und den entsprechenden Schlag gebe, kann ich den Stab noch weiter theilen, wie in Fig. 55 (a. v. S.).

§. 3. Chladni's Tonometer: Die Eisenvioline, die Spieldose und das Kaleidophon.

Wir wollen jetzt den Stab so weit kürzen, dass seine Schwingungen wohlklingend tönen. Wird er ungefähr 10 cm lang, so giebt er, wenn er mit dem Bogen gestrichen wird, einen tiefen musikalischen Ton aus. Kürze ich den Stab noch mehr, so wird der Ton höher, und fahre ich so mit Kürzen fort, so nimmt die Zahl der Schwingungen zu, bis zuletzt der Ton unangenehm scharf wird. Diese musikalischen Schwingungen weichen nur durch ihre Zahl von den gröberen Schwingungen ab, die vorher das Auge trafen.

Die Zunahme der Zahl der hier beobachteten Schwingungen folgt einem bestimmten Gesetz; die Zahl der Schwingungen in einer bestimmten Zeit ist dem Quadrat der Länge des schwingenden Stabes umgekehrt proportional. Sie hören den Ton dieses 5 cm langen Messingstreifens, wenn ich mit dem Violinbogen über sein Ende streiche. Der Streifen ist jetzt 2,5 cm lang; der Ton ist die zweit höhere Octave des letzteren; seine Schwingungszahl ist die vierfache. So vermindern wir die Schwingungszahl auf ein Viertel, wenn wir die Länge des schwingenden Stabes verdoppeln; verdreifachen wir seine Länge, so vermindern wir die Schwingungszahl auf ein Neuntel; vervierfachen wir die Länge, so vermindern wir die Zahl der Schwingungen auf ein Sechzehntel u. s. f. Es ist klar, dass, wenn wir so fortfahren, wir zuletzt

eine Länge erreichen, wo die Schwingungen so langsam werden, dass wir sie mit dem Auge zählen könnten. Umgekehrt könnten wir, wenn wir mit einem langen Streifen anfangen, dessen Schwingungen gezählt werden können, durch Kürzen nicht nur den Streifen zum Tönen bringen, sondern auch die den verschiedenen Tönen entsprechende Schwingungszahl bestimmen. Gehen wir von einem 90 cm langen Streifen aus, der einmal in der Secunde schwingt, so würde der Streifen, wenn er nur noch 30 cm Länge hätte, nach dem obigen Gesetz neun Schwingungen in der Secunde ausführen. Bis auf 15 cm verkürzt, würde er 36, bis auf 7,5 cm 144, und wenn er nur noch 2,5 cm Länge hätte, würde er 1,296 Mal in der Secunde schwingen. Man kann leicht die Zwischenstufen zwischen den hier gegebenen Längen ausfüllen und so die Schwingungszahl bestimmen, die jedem einzelnen Ton entspricht. Chladni schlug diese Methode vor und führte sie aus.

Man kann ein musikalisches Instrument aus kurzen Stäben herstellen. In diesem Holzbrett ist eine Reihe von verschieden langen, dicken Eisendrähten befestigt, die in einem Halbkreise angeordnet sind. Streicht man mit dem Violinbogen über die Reihe, so erhält man eine Tonleiter von sehr angenehm klingenden Tönen. Ein geschickter Spieler könnte sicher einer genügenden Anzahl dieser eisernen Stifte eine ganz erträgliche Musik entlocken. Die Eisenvioline hat diese Gestalt. Auch die Töne der gewöhnlichen Spieldose werden durch Schwingungen von Metallzungen erzeugt, die an dem einen Ende befestigt sind. In einer sich drehenden Walze sind Stifte befestigt, durch welche die freien Enden der Zungen gehoben und dann plötzlich losgelassen werden. Die Zungen schwingen, ihre Länge und Dicke ist so an-

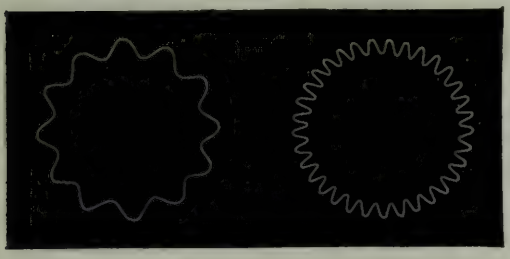
geordnet, dass eine jede von ihnen im gegebenen Augenblick die nothwendige Zahl der Schwingungen erzeugt.

Sir Charles Wheatstone hat eine einfache und sinnreiche optische Methode erfunden, um die Schwingungen der an einem Ende befestigten, schwingenden Stäbe zu beobachten. Er befestigte leichte, innen versilberte Glaskugeln an dem Ende eines Metallstabes, liess das Licht einer Lampe oder einer Kerze auf die Kugel fallen, und erhielt so einen kleinen, hell erleuchteten Punkt. Schwang der Stab, so beschrieb der Punkt eine glänzende Lichtlinie, die den Charakter der Schwingungen bezeichnete. Eine in einem Schraubstock befestigte Stricknadel, an welche oben eine kleine Perle mit Marineleim angeklebt ist, genügt für den Versuch. In dem vollkommeneren Instrument, das Wheatstone Kaleidophon nennt, sind die schwingenden Stäbe fest in einen massiven Ständer geschraubt. Man erhält durch diese einfache Vorrichtung sehr schöne Figuren, von denen ich einige in vergrössertem Maassstabe auf den vor Ihnen stehenden Schirm projiciren will.

Ich befestige den Stab horizontal im Schraubstock und lasse die convergirenden Strahlen der elektrischen Lampe auf die versilberte Kugel fallen; ich erhalte so einen Punkt von sonnengleichem Glanz. Stelle ich eine Linse vor die Kugel, so werfe ich ein glänzendes Bild des Punktes auf den Schirm, die Nadel wird dann seitwärts gezogen und schnell losgelassen. Der Punkt beschreibt zuerst ein gerades Lichtband, das sich schnell zu einer Ellipse öffnet, in einen Kreis übergeht und dann wieder durch eine zweite Ellipse zur geraden Linie zurückkehrt. Dies kommt daher, dass der in dem Schraubstock befestigte Stab nicht nur in der Richtung

schwingt, in der er zur Seite gezogen wird, sondern auch im rechten Winkel zu dieser Richtung. Die Curve rührt von der Vereinigung der beiden auf einander rechtwinkligen Schwingungen her [1]). Während der Stab so als Ganzes schwingt, kann er sich auch in schwingende Theile theilen. Ziehe ich einen Violinbogen richtig über die Nadel, so erhalte ich diesen zackigen Kreis, Fig. 56, da eine Anzahl kleiner Wellenbewegungen über der grösseren liegt. Ueberdies hören Sie noch einen Ton, den Sie nicht vernahmen, als der Stab als Ganzes schwang; seine Schwingungen waren damals zu langsam, um einen solchen Ton zu erzeugen. Die Schwingungen, die diese schlangenförmigen Krümmungen bilden, und die der ersten Theilung des Stabes entsprechen, erfolgen ungefähr $6^1/_4$ Mal so schnell, wie die Schwingungen des Stabes als Ganzes. Und wieder streiche ich mit dem Bogen; der Ton wird höher, die Zacken laufen dichter zusammen und bilden eine feinere und wo möglich noch schönere leuchtende Wellenlinie als die letzte (Fig. 57). Wir haben hier die zweite Theilung des Stabes; die wellenförmigen Krümmungen entsprechen jetzt einer $17^{13}/_{16}$ Mal kleineren Schwingungsdauer, als da, wo der Stab als Ganzes oscillirte. So wird jede Aenderung im Ton des Stabes von einem Wechsel der Figuren auf dem Schirm begleitet.

Fig. 56. Fig. 57.



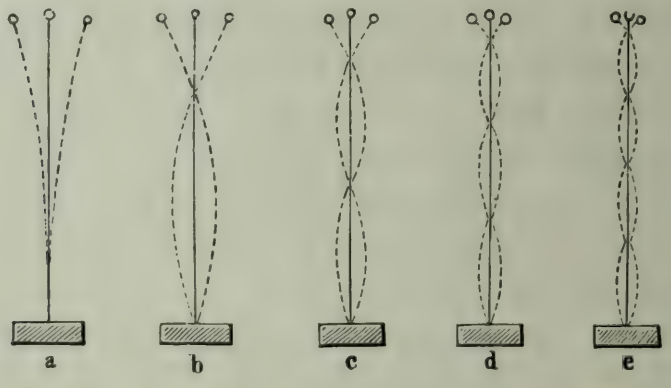
[1]) Auch Chladni beobachtete diese Vereinigung der Schwingungen und stellte eine Reihe von Versuchen an, die in ihrer weiteren Ausführung zu dem Kaleidophon führten. Wir werden die Zusammensetzung der Schwingungen in einer späteren Vorlesung genauer untersuchen.

Die Schwingungszahl des Stabes als Ganzes verhält sich zu der Zahl, die seiner ersten Theilung entspricht, ungefähr wie das Quadrat von 2 zu dem Quadrat von 5, oder wie 4 : 25. Von der ersten Theilung aufwärts sind die Schwingungszahlen den Quadraten der Reihe der ungeraden Zahlen 3, 5, 7, 9, 11 u. s. f. annähernd proportional. Nehmen wir an, dass die Schwingungen des Stabes als Ganzes in der Zeiteinheit 36 seien, so würden die Schwingungen, die dieser und den folgenden Theilungen entsprächen, annähernd durch folgende Zahlenreihe ausgedrückt werden:

36, 225, 625, 1225, 2025 u. s. f.

In Fig. 58, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, sind die dieser Zahlenreihe entsprechenden Theilungsarten gezeichnet. Sie beob-

Fig. 58.

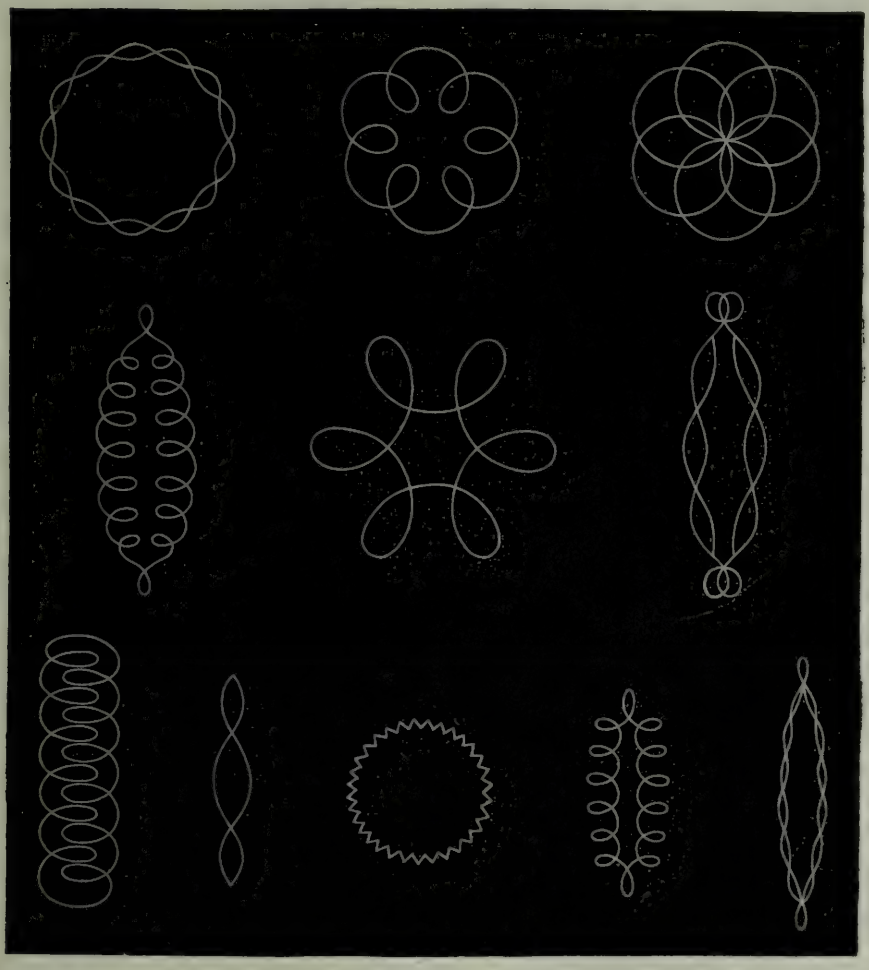


achten, dass die Tonhöhe dieser Obertöne eines schwingenden Stabes schneller steigt, als die der harmonischen Töne einer Saite.

Man kann andere Schwingungsarten erhalten, wenn man den Stab plötzlich mit dem Finger in der Nähe des befestigten Endes schlägt. Man kann so eine fast unendliche Anzahl von verschiedenen leuchtenden Ringen darstellen, von deren Schönheit man sich ein Bild nach den beifolgenden, von Sir Charles Wheatstone zuerst

beobachteten Figuren machen kann (Fig. 59). Sie können hervorgerufen werden, wenn man die Kugel durch

Fig. 59.



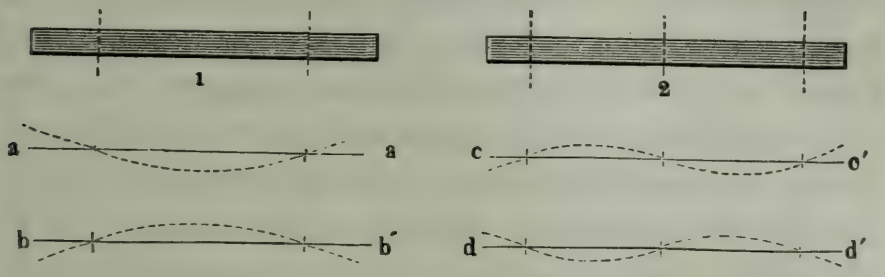
Sonnenlicht oder durch das Licht einer Kerze erleuchtet. Man kann auch die Ringe verdoppeln, wenn man statt eines Lichtes zwei nimmt. Es erscheinen dann zwei Lichtpunkte, von denen jeder seine eigene leuchtende Linie beschreibt, wenn die Stricknadel in Schwingungen versetzt wird. Das Kaleidophon wurde von Sir Charles Wheatstone auf diese Weise zu einem Photometer verwendet.

§. 4. Transversale Schwingungen eines an beiden Enden freien Stabes. — Das Holzinstrument und die Glasharmonika.

Wir wollen jetzt von dem, an einem Ende befestigten Stabe zu dem an beiden Enden befestigten übergehen; denn auch diese Anordnung ist bei musikalischen Instrumenten benutzt worden. Nach einer später zu beschreibenden Methode bestimmte Chladni, der Vater der neueren Akustik, die verschiedenen Schwingungsarten solcher Stäbe durch Versuche. Die einfachste Theilungsart tritt hier ein, wenn der Stab durch zwei Knoten in drei schwingende Theile getheilt wird. Sie erklärt sich leicht durch dieses biegsame, 2 m lange Lineal. Halte ich es ungefähr 30 cm von jedem seiner Enden entfernt, zwischen dem Zeigefinger und Daumen meiner Hände, und schüttele es oder lasse gegen seinen Mittelpunkt schlagen, so schwingt es, indem der mittlere Bauch einen spindel- und die beiden Enden fächerartige Schatten bilden. Der Schatten des Lineals auf dem Schirm macht die Schwingungsart noch deutlicher. In diesem Falle beträgt die Entfernung der Knoten von dem Ende des Lineals ungefähr ein Viertel von dem Abstande beider Knoten. Bei der zweiten Schwingungsart wird der Stab oder das Lineal in vier schwingende Theile durch drei Knoten getheilt. In Fig. 60, 1 und 2 sind diese Theilungsarten aufgezeichnet Sehen wir die Kante des Stabes 1 an, so zeigen die punktirten Linien aa', bb' die Art, in der die Abschnitte sich auf- und niederbiegen, wenn die erste Theilung eintritt, während cc', dd' die Schwingungsart anzeigen, die der zweiten Theilung entspricht. Der tiefste Ton eines an beiden

Enden freien Stabes ist höher als der tiefste Ton eines an einem Ende befestigten Stabes, im Verhältniss von

Fig. 60.



4 : 25. Beginnen wir mit den ersten beiden Knoten, so steigen die Schwingungszahlen des freien Stabes in folgendem Verhältniss:

Zahl der Knoten	2, 3, 4, 5, 6, 7
Zahlen, deren Quadraten die Schwingungszahl annähernd proportional ist } . .	3, 5, 7, 9, 11, 13

Auch hier haben wir ein ähnliches schnelles Steigen der Tonhöhe, wie in den beiden letzten Fällen.

Für musikalische Zwecke ist nur die erste Theilung eines freien Stabes benutzt worden. Werden Holz-

Fig. 61.

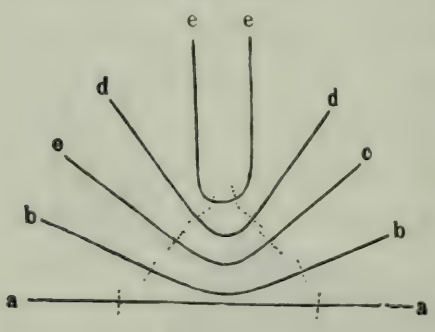
stäbe von verschiedener Länge, Breite und Dicke auf eine Schnur gezogen, die durch die Knoten geht, so haben wir das Holzinstrument der Franzosen, das

vor Ihnen liegt (*AB*, Fig. 61 a. v. S.). An einem Ende hänge ich die Schnur an dem Haken *k* auf, halte das andere Ende in meiner linken Hand und schlage der Reihe nach die Stäbe mit dem Hammer *h* an, und erhalte dadurch diese wohlklingende Tonleiter. Man kann auch die Stäbe, statt sie auf eine Schnur zu ziehen, auf Seilen von gedrehtem Stroh ruhen lassen; daher kommt der für das Instrument bisweilen angewendete Namen Strohfidel. Chladni erzählt uns, dass es an Stelle eines Glockenspieles in der Zauberflöte von Mozart benutzt wurde. Bei der Glasharmonika verwenden wir Glasstreifen statt der Holzstäbe.

§. 5. Schwingungen einer Stimmgabel.

Von den Schwingungen eines an beiden Enden freien Stabes können wir leicht zu den Schwingungen einer Stimmgabel übergehen, wie sie Chladni analysirt hat. *aa* (Fig. 62) mag ein gerader Stab sein, dessen Knotenpunkte seiner ersten Theilungsart, die durch punktirte Linien bezeichnet ist, entsprechen. Wird der Stab in die Form *bb* gebogen, so bleiben die beiden Knotenpunkte noch bestehen, aber sie haben sich einander genähert. Der Ton des gebogenen Stabes ist auch etwas tiefer, als der des geraden. Steigern wir allmählich die Biegung durch *cc*, *dd*, so verwandeln wir zuletzt den Stab in eine Stimmgabel *ee* mit parallelen Zinken; er behält noch seine zwei Knotenpunkte, die indess viel näher an einander stehen als vorher, wo der Stab noch gerade war

Fig. 62.



Giebt eine solche Gabel ihren tiefsten Ton an, so schwingt ihr freies Ende, wie in Fig. 63, wo die Zinken zwischen den Grenzen *b* und *n* und *f* und *m* schwingen, und wo *p* und *q* die Knoten sind. Es giebt keine Theilung der Stimmgabel, die der Theilung eines geraden Stabes durch drei Knoten entspräche. Bei der zweiten Theilungsart, welche dem ersten Oberton der Gabel entspricht, haben wir einen Knoten auf jeder Zinke und zwei an der Biegung. Das auf Seite 138 besprochene Gesetz von Young gilt auch für die Stimmgabeln. Um den Grundton frei von einem Oberton zu erhalten, müssen Sie den Bogen an einer Stelle über die Gabel führen, wo sich für die letzteren ein Knoten bildet. Bei der dritten Theilungsart sind zwei Knoten auf jeder Zinke und einer an der Biegung; bei der vierten zwei Knoten auf jeder Zinke und zwei an der Biegung; bei der fünften drei Knoten auf jeder Zinke und einer an der Biegung. Der erste Oberton der Gabel verlangt nach Chladni eine $6^1/_4$ mal so grosse Schwingungszahl wie der Grundton.

Fig. 63.

Es ist leicht, einer Stimmgabel ihre Obertöne zu entlocken. Hier ist z. B. unsere alte Reihe von Gabeln, die resp. 556, 320, 384 und 512 mal in der Secunde schwingen. Wenn ich bei Allen vom Grundton zum ersten Oberton übergehe, so beobachten Sie, dass das Intervall bei Weitem grösser ist, als das Intervall zwischen dem Grundton und dem ersten Oberton einer gespannten Saite. Wir springen von den eben genannten Zahlen plötzlich auf 1,600, 2,000, 2,400 und 3,200 Schwingungen in der Secunde.

Obgleich Chladni's Zahlen annähernd richtig sind, werden sie doch nicht immer völlig durch den Versuch

bestätigt. So können z. B. ein Paar Gabeln vollkommen gleiche Grundtöne haben, aber ihre Obertöne stimmen nicht. Zwei solche Gabeln stehen jetzt vor Ihnen. Werden die Grundtöne beider angeschlagen, so ist der Einklang ein vollkommener. Klingen aber die ersten Obertöne beider, so stimmen sie nicht: Sie hören schnelle Schläge, die das Ohr verletzen. Beschwere ich die eine dieser Gabeln mit Wachs, so kann ich die beiden Obertöne in Einklang bringen; jetzt aber erzeugen die Grundtöne laute Schläge, wenn sie zusammen angeschlagen werden. Es könnte dies nicht eintreten, wenn der erste Oberton jeder Gabel eine Schwingungszahl besässe, die genau das $6^1/_4$ fache von der des Grundtones wäre. Bei einer Reihe von Gabeln war nach Helmholtz die Schwingungszahl des ersten Obertones die 5,8- bis 6,6 fache von der des Grundtones.

Gehen wir von dem ersten Oberton aus, so verhält sich die ganze Reihe der Obertöne wie die Quadrate der Zahlen 3, 5, 7, 9 u. s. f. Das heisst, in der Zeit, die der erste Oberton braucht, um neun Schwingungen auszuführen, führt der zweite 25, der dritte 49, der vierte 81 Schwingungen aus u. s. f. So steigen die Obertöne der Gabel bei Weitem schneller als die einer Saite. Sie verschwinden auch schneller und verfälschen daher den Grundton durch ihre Beimischung weniger.

§. 6. Chladni's Figuren.

Die Erfindung Chladni's, die tönenden Schwingungen sichtbar zu machen, ist für die Akustik von sehr grosser Wichtigkeit gewesen. Lichtenberg hatte den Versuch gemacht, elektrisches Pulver auf einen elektrisirten Harzkuchen zu streuen; die Lagerung des Pulvers zeigte die elektrische Beschaffenheit der Ober-

H Adlard Sc

Chladni.

fläche an. Dieser Versuch führte Chladni auf den Gedanken, Tonschwingungen durch Sand sichtbar zu machen, den er auf die Oberfläche des schwingenden Körpers streute. Chladni's eigener Bericht über seine Entdeckung ist so interessant, dass wir ihn hier wohl mit Recht einschalten können:

„Ziemlich spät, nämlich erst im 19. Jahre, hatte ich angefangen, etwas Clavierspielen zu erlernen, und las nachher verschiedene Schriften über die Tonkunst, wobei ich fand, dass die physisch-mathematischen Voraussetzungen derselben weit mangelhafter waren bearbeitet worden, als manche andere Fächer der Naturkunde, weshalb ich glaubte, dass darin am meisten würde zu entdecken sein. Bei einigen Versuchen, die ich über die bekannten Schwingungen der Saiten und über die von Daniel Bernoulli und L. Fuler zuerst bestimmten Schwingungen eines Stabes anstellte, stimmte die Erfahrung mit der Theorie völlig überein, bei manchen klingenden Körpern wird das nicht von der Erfahrung bestätigt, was darüber gesagt war, und über die Schwingungsarten und Tonverhältnisse verschiedener Arten von klingenden Körpern fand ich nirgends Belehrung. Unter anderen hatte ich bemerkt, dass eine jede nicht gar zu kleine Glas- oder Metallscheibe mannigfaltige Töne gab, wenn ich sie an verschiedene Stellen hielt und anschlug, und wünschte den Grund dieser noch von Niemandem untersuchten Verschiedenheit der Töne zu wissen. Ich spannte eine messingene Scheibe, die zu einer Schleifmaschine gehörte, an einem in ihrer Mitte befindlichen Zapfen in einen Schraubenstock und bemerkte, dass durch Striche mit dem Violinbogen sich darauf verschiedene Töne hervorbringen liessen, die stärker und anhaltender waren, als man sie durch Anschlagen er-

halten kann. Dass nicht nur Saiten, sondern auch andere elastische Körper durch Streichen mit dem Violinbogen zum Klingen gebracht werden können, ist keine Erfindung von mir, indem die Eisenvioline längst bekannt war und ich auch Nachrichten von einem in Italien vom Abbate Mazzochi verfertigten Instrumente, wo Glocken mit zwei oder mehreren Violinbogen gestrichen werden, gelesen hatte, aber die Idee, den Violinbogen zur Untersuchung klingender Körper anzuwenden, habe ich zuerst gehabt. Die Beobachtungen von Lichtenberg über die Figuren, welche sich bei dem Aufstreuen des Harzstaubes auf Glas- oder Harzscheiben bei verschiedener Elektricität zeigen (in den Commentarien der Göttingischen Societät der Wissenschaften), worüber ich auch verschiedene Versuche anstellte, erregten in mir den Gedanken, dass vielleicht die mannigfaltigen schwingenden Bewegungen einer Scheibe sich ebenfalls durch eine Verschiedenheit der Erscheinungen verrathen würden, wenn ich Sand oder etwas dem Aehnliches aufstreute. Es erschien auch bei diesem Verfahren auf der vorher erwähnten Scheibe eine sternförmige Figur (und der hohe Ton in der erwähnten Tonreihe war der, der mit dem Quadrat der Zahl der diametralen Linien übereinstimmte).

§. 7. Schwingungen quadratischer Platten. — Knotenlinien.

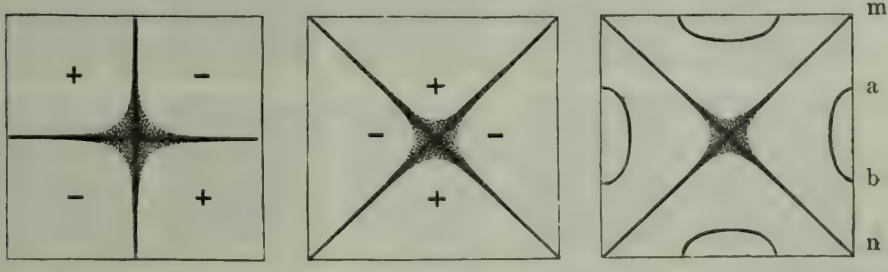
Ich will die Versuche von Chladni jetzt zeigen und beginne mit einer quadratischen Glasplatte, die durch eine geeignete Klemme in ihrem Mittelpunkte gehalten wird. Ich könnte auch die Platte mit meinem Zeigefinger und Daumen halten, wenn diese so weit reichten. Ich streue feinen Sand auf die Platte, dämpfe den Punkt in der

Mitte einer ihrer Ränder, indem ich ihn mit meinem Nagel berühre, und streiche mit dem Bogen über den Rand der Platte nahe an einer ihrer Ecken. Der Sand wird von einzelnen Theilen der Oberfläche fortgeschleudert und legt sich in zwei Knotenlinien (Fig. 64), die das grössere Quadrat in vier kleinere theilen. Diese Theilung der Platte entspricht ihrem tiefsten Ton.

Die in der Figur angewendeten Zeichen + und — zeigen an, dass die beiden so bezeichneten Quadrate sich immer in entgegengesetzter Richtung bewegen. Sind die mit + bezeichneten Quadrate über der mittleren Ebene der Platte, so sind die mit — bezeichneten darunter, und sind die mit — bezeichneten über der Ebene der Platte, so sind die mit + bezeichneten darunter. Die Knotenlinien geben die Grenzen dieser entgegengesetzten Bewegungen an. Sie bilden die Stellen des Ueberganges von einer Bewegung zur anderen und werden daher von keiner berührt.

Ich streue noch einmal Sand auf die Oberfläche, dämpfe eine der Ecken der Platte und errege sie, indem ich mit dem Bogen über die Mitte einer ihrer Ränder streiche. Der Sand tanzt auf der Oberfläche der Platte

Fig. 64. Fig. 65. Fig. 66.

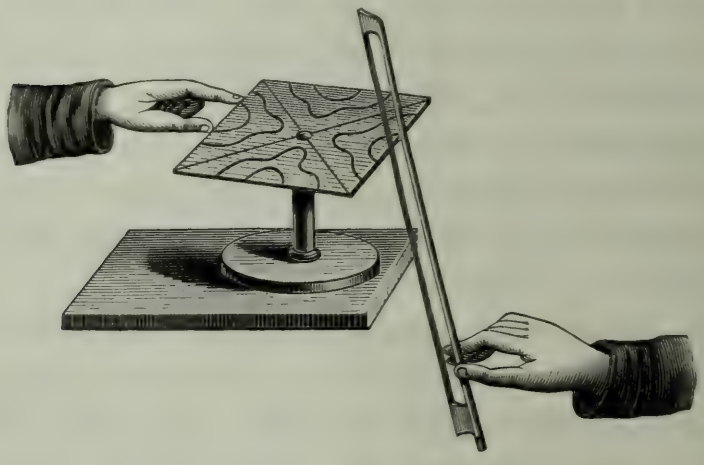


und ordnet sich zuletzt in zwei scharf gezeichneten Streifen nach ihren Diagonalen (Fig. 65) an. Der hier erzeugte Ton liegt eine Quinte über dem letzten. Dämpfe

ich jetzt zwei andere Punkte (Fig. 66 a. v. S.) und ziehe den Bogen über die Mitte des entgegengesetzten Randes der Platte, so erhalten wir einen bei Weitem höheren Ton als vorher; die Art, wie die Platte schwingt, um diesen Ton zu erzeugen, ist in der Abbildung Fig. 66 gezeichnet.

Bis jetzt habe ich Glasplatten verwendet, die durch eine Klemme in der Mitte gehalten wurden. Metallplatten eignen sich noch besser für diese Versuche. Fig. 67 stellt eine Messingplatte von 30 cm im Quadrat dar, die von einem entsprechenden Ständer getragen

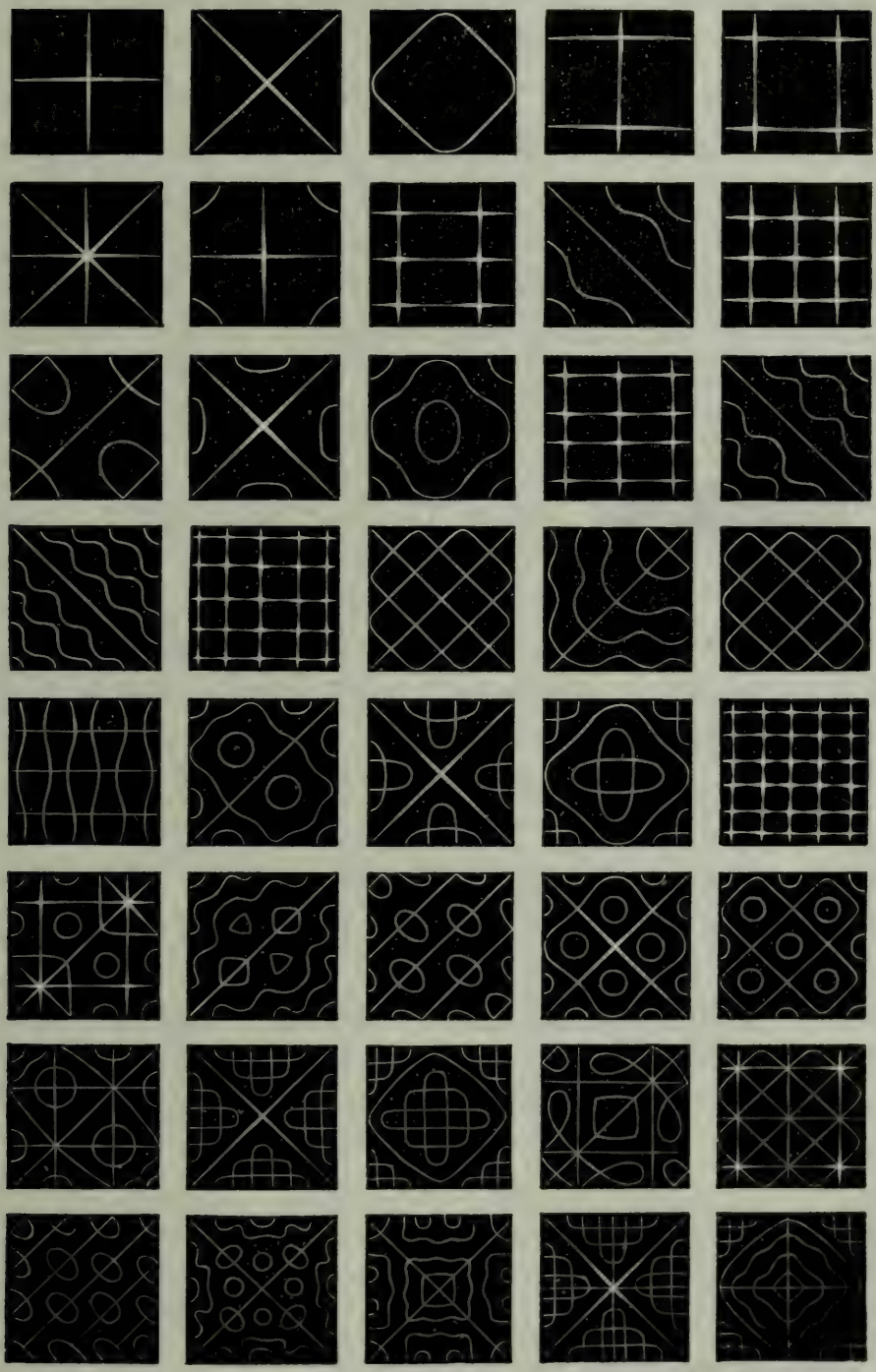
Fig. 67.



wird. Dämpfe ich sie mit dem Zeigefinger und Daumen meiner linken Hand an zwei Punkten an ihrem Rande und ziehe den Bogen mit meiner rechten über einen schwingenden Theil an dem entgegengesetzten Rande, so erhalte ich diese zusammengesetzte Figur (Fig. 67).

Fig. 68 stellt eine Reihe schöner Klangfiguren dar, die Chladni durch verschiedenartiges Dämpfen und Anstreichen von viereckigen Platten erhielt. Die Geschwindigkeit, mit der sich diese scharf gezeichneten Figuren durch den Bogenstrich eines geübten Experimentators bilden, ist überraschend.

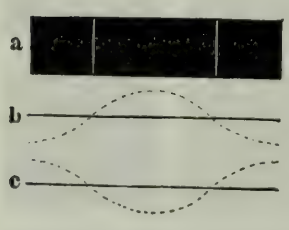
Fig. 68.



§. 8. Wheatstone's Analyse der Schwingungen von quadratischen Platten.

Wir wollen jetzt den Mechanismus dieser Schwingungen etwas näher betrachten. Die Art und Weise, in der sich ein an beiden Enden freier Stab theilt, wenn er transversal schwingt, ist schon besprochen worden. Ein rechteckiges Stück Glas oder Metallblech, z. B. die Glasstreifen der Harmonika, gehorchen ebenfalls den Gesetzen der Stäbe und Stangen, die mit freien Enden schwingen.

Fig. 69.



In Fig. 69 ist ein Rechteck *a* mit den Knotenlinien gezeichnet, die der ersten Theilung entsprechen, und darunter die Auf- und Abbiegung des seitwärts gesehenen Rechtecks bei seinen Schwingungen [1]). Die Biegung ist der Deutlichkeit halber sehr übertrieben. Die Figuren *b* und *c* zeigen an, dass die schwingenden Theile der Platte abwechselnd über die mittlere Ebene der Platte steigen und unter dieselbe sinken. In einem Augenblick ist z. B. die Mitte der Platte über der Ebene und ihre Enden sind unter ihr, wie bei *b*; während im nächsten Augenblick ihre Mitte unter und ihre beiden Enden über der mittleren Ebene der Platte sind, wie bei *c*. Die Schwingungen der Platte bestehen in der schnell auf einander folgenden Annahme

[1]) Ich entnehme diese Figur der Abhandlung von Wheatstone, indess liegen in Wirklichkeit die Knoten den Enden näher und die freien Endtheile der punktirten Linien müssten nicht auf- und abwärts gebogen sein. Die Knotenlinien in den beiden folgenden Figuren liegen ebenfalls weiter von den wirklichen Rändern der Platte ab, als in der Figur angegeben ist. (Siehe Fig. 60.)

dieser beiden Stellungen. Aehnliche Bemerkungen lassen sich für alle anderen Theilungsarten machen.

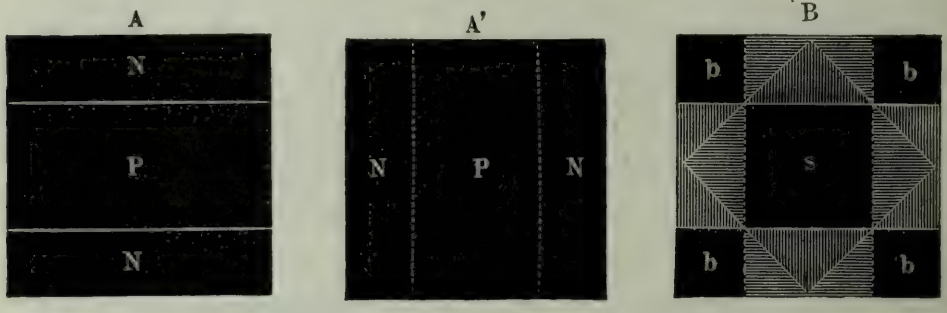
Denken Sie sich jetzt, dass das Rechteck sich allmählich verbreitert, bis es ein Quadrat wird. Dann wäre kein Grund vorhanden, warum sich die Knotenlinien eher dem einen Seitenpaare parallel bilden sollten, als dem anderen. Wir wollen jetzt untersuchen, was die Wirkung einer Vereinigung zweier solcher Schwingungssysteme auf derselben Platte sein würde.

Der klareren Vorstellung wegen nehmen Sie zwei quadratische Glasplatten und ziehen auf jede die Knotenlinien, die einem Rechteck zukommen. Ziehen Sie die Linien auf der einen Platte weiss, auf der anderen schwarz, so können Sie die Platten deutlich von einander unterscheiden. Legen Sie jetzt das eine Quadrat so auf das andere, dass ihre Knotenlinien zusammenfallen, und dann stellen Sie sich deutlich beide in Schwingungen gerathene Platten vor. Wir wollen zuerst annehmen, dass die Schwingungen der beiden Platten übereinstimmen, dass der mittlere und die Endtheile einer jeden zugleich steigen und fallen; und nun denken Sie sich, dass die Schwingungen der einen Platte auf die andere übertragen würden. Welches würde das Resultat sein? Sicher würde die Platte, welche diesen Zuwachs erhalten hat, Schwingungen von der doppelten Amplitude machen. Nehmen wir aber an, dass die Schwingungen der beiden Platten, statt übereinzustimmen, einander gerade entgegengesetzt sind — dass, wenn der mittlere Theil der einen steigt, der mittlere Theil der anderen fällt —, was würde aus der Addition beider Schwingungen folgen? Sicher die Aufhebung aller Schwingungen.

Statt die Platten so zu legen, dass ihre Knotenlinien zusammenfallen, wollen wir diese Linien sich jetzt in

rechten Winkeln kreuzen lassen, d. h. wir wollen A über A' (Fig. 70) legen. In diesen Abbildungen bedeutet der Buchstabe P positiv; er zeigt in dem Theile, wo er steht, eine Bewegung der Platte nach aufwärts an, während N negativ bedeutet und da, wo er steht, eine Bewegung nach abwärts anzeigt. Sie haben jetzt im dritten

Fig. 70.

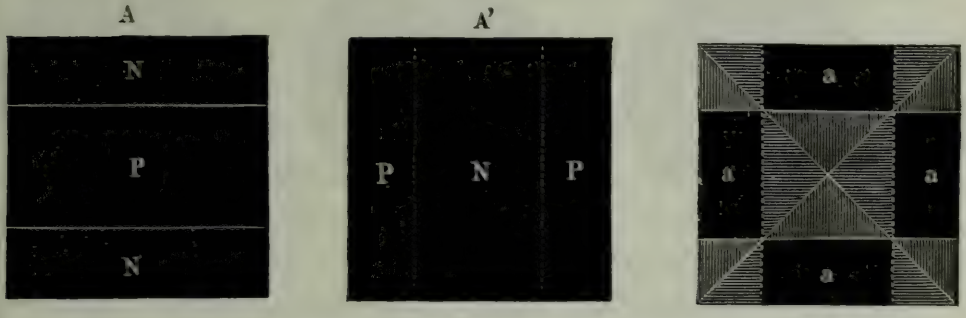


Quadrat eine Art von Muster vor sich, das aus einem Quadrat S in der Mitte, einem kleineren Quadrat b in jeder Ecke und vier rechteckigen Figuren an den mittleren Theilen der vier Seiten besteht. Wir wollen die Platten schwingen lassen und nun annehmen, dass die Schwingungen der einen Platte auf die andere übertragen seien. Was muss eintreten? Nach kurzem Nachdenken werden Sie finden, dass das grosse mittlere Quadrat S mit vermehrter Kraft schwingen muss, weil hier die Schwingungen der beiden Platten sich unterstützen; dasselbe gilt auch für die vier kleineren Quadrate b, b, b, b, in den vier Ecken: Sie werden sich aber sogleich überzeugen, dass die Schwingungen der vier schattirten Rechtecke einander entgegengesetzt sind, und dass sie sich an den Stellen gegenseitig vernichten werden, wo ihre Amplituden gleich sind. Der Mittelpunkt einer jeden Seite der Glasplatte ist daher ein Ruhepunkt; die Punkte, wo sich die Knotenlinien der beiden Platten kreuzen, sind daher ebenfalls Ruhepunkte.

Ziehen Sie eine Linie durch je drei von diesen Punkten, so erhalten Sie ein zweites, in das erste eingeschriebene Quadrat. Die Seiten dieses Quadrates sind Linien ohne Bewegung.

Wir haben die Frage bis jetzt nur theoretisch behandelt; doch nun klemme ich eine quadratische Glasplatte an einem Punkte nahe dem Mittelpunkte eines ihrer Ränder fest, und ziehe den Bogen über die zunächstliegende Ecke der Platte. So erhalte ich, wenn das Glas homogen ist, eine Figur, die diesem eingeschriebenen Quadrat sehr ähnlich ist. Die Ursache hierfür ist, dass in der so bewegten Platte die beiden von uns betrachteten Schwingungsarten wirklich zu gleicher Zeit existiren und

Fig. 71.



die ihrer Vereinigung entsprechende Figur *B* (Fig. 70) erzeugen.

Legen wir nochmals die quadratischen Glasplatten, wie vorher, genau auf einander; aber statt dass ihre Schwingungen übereinstimmen, mögen jetzt ihre correspondirenden Abschnitte einander entgegen schwingen; also *A* soll *A'* (Fig. 71) decken. Dann ist es klar, dass bei der Uebereinanderlagerung der Schwingungen der Mittelpunkt unseres mittleren Quadrates ein Ruhepunkt sein muss, denn hier sind die Schwingungen gleich und entgegengesetzt. Die Durchschnittspunkte der Knotenlinien sind ebenfalls Ruhepunkte, und so auch jede

Ecke der Platte selbst, denn auch hier sind die zu einander addirten Schwingungen gleich und entgegengesetzt. So haben wir vier Ruhepunkte auf jeder Diagonale des Quadrates. Ziehen Sie die Diagonalen, so werden dieselben die Knotenlinien geben, die aus der Uebereinanderlagerung der beiden Schwingungen folgen.

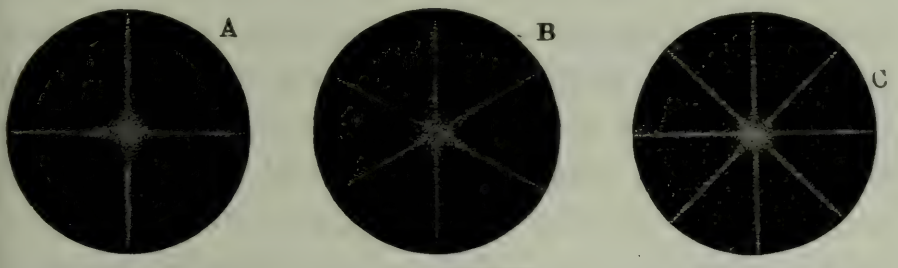
Diese beiden Systeme bestehen wirklich neben einander in derselben Platte, wenn der Mittelpunkt eingeklemmt ist und eine der Ecken gedämpft wird, während man mit dem Violinbogen über die Mitte einer ihrer Ränder streicht. In diesem Falle lagert sich auch der Sand, der die Ruhelinien angiebt, in Diagonalen. Es ist dies in der möglichst einfachen Form Wheatstone's Analyse der über einander gelagerten Schwingungen.

§. 9. Schwingungen von kreisförmigen Platten.

Gehen wir von den quadratischen Platten zu den kreisförmigen über, so erhalten wir gleichfalls verschiedene schöne Wirkungen. Diese Messingscheibe wird horizontal von einem aufrecht stehenden Ständer getragen; sie ist geschwärzt worden und feiner weisser Sand leicht darauf gestreut. Die Scheibe kann sich in verschiedener Weise theilen und kann Töne von verschiedener Höhe ausgeben. Ich lasse den tiefsten Grundton der Scheibe anklingen, indem ich den Rand an einem bestimmten Punkte dämpfe und mit dem Bogen über einen, 45 Grad von dem gedämpften Punkte entfernten Punkt des Randes streiche. Sie hören den Ton und Sie sehen den Sand. Er verlässt die vier Quadranten der Scheibe und lagert sich auf die beiden Durchmesser (Fig. 72 *A*). Theilt sich eine Scheibe so in vier schwingende Theile, dann erklingt ihr tiefster Ton. Ich halte jetzt die Schwingungen an, reinige die Scheibe und streue noch einmal Sand

darauf. Dämpfe ich ihren Rand und streiche mit dem Bogen den Punkt, der 30 Grad vom gedämpften entfernt ist, so legt sich der Sand sogleich in Form eines Sternes. Wir haben hier sechs schwingende Theile, die von einander durch radiale Knotenlinien getrennt sind (Fig. 72 *B*). Ich dämpfe wieder einen Punkt und errege einen anderen, der dem gedämpften etwas näher liegt, als im letzten Falle; die Scheibe theilt sich in acht schwingende Theile mit den Sandlinien dazwischen (Fig. 72 *C*). Auf diese Weise kann die Scheibe in zehn, zwölf, vierzehn, sechszehn Sectoren getheilt werden; die Zahl der Sectoren bleibt immer eine gerade. Wie die Theile zahl-

Fig. 72.



reicher werden, werden die Schwingungen zahlreicher und die Tonhöhe folglich höher. Der bei der Theilung der Scheibe in sechszehn Theile gehörte Ton ist so scharf, dass er dem Ohr wehe thut. Dies ist Chladni's erste Entdeckung. Sie werden seine Aufregung begreifen können, als er die wunderbare Wirkung sah, „die vor ihm noch kein Sterblicher gesehen hatte". Lässt man den Mittelpunkt der Scheibe frei schwingen und dämpft geeignete Punkte ihrer Oberfläche, so kann man Knotenkreise und andere gebogene Linien erhalten.

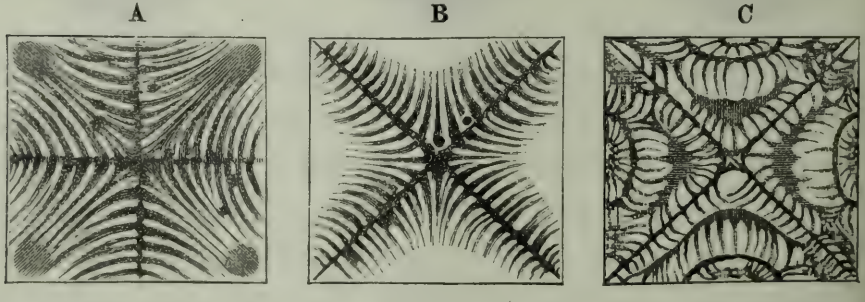
Die Schwingungszahl einer Scheibe ist ihrer Dicke direct und dem Quadrat ihres Durchmessers umgekehrt proportional. Ich habe hier drei Scheiben, zwei von ihnen haben denselben Durchmesser, aber die eine ist

noch einmal so dick als die andere; zwei von ihnen haben dieselbe Dicke, aber die eine hat den halben Durchmesser der anderen. Nach dem eben ausgesprochenen Gesetz verhalten sich die Schwingungszahlen dieser drei Scheiben wie 1, 2, 4. Wenn sie der Reihe nach ertönen, werden die hier anwesenden musikalischen Ohren bestätigen, dass die Töne wirklich zu einander im Verhältniss eines Tones zu seiner Octave und seiner doppelten Octave stehen.

§. 10. Versuche von Strehlke und Faraday: Verhalten leichter Pulver.

Man kann die Fortbewegung des Sandes nach den Knotenlinien hin am besten beobachten, wenn man den Sand mit einer dickflüssigen Substanz mengt. Benutzt man Gummi, um die Bewegung der Theilchen zu verzögern, so sieht man die Curven, die sie einzeln beschreiben, sehr deutlich auf den Platten verzeichnet. Die Abbildungen *A*, *B*, *C* (Fig. 73) sind den von Strehlke gegebenen Zeichnungen dieser Erscheinungen entnommen.

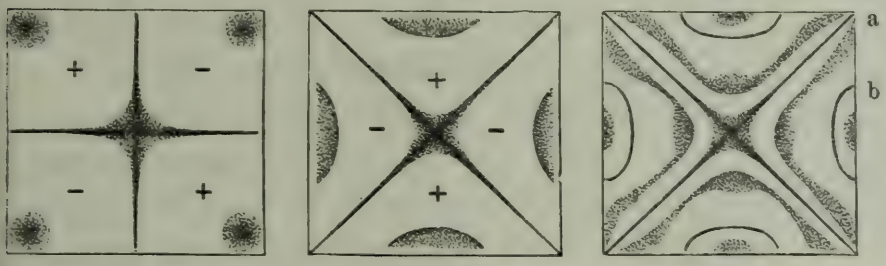
Fig. 73.



Eine eigenthümliche Erscheinung bei den schwingenden Platten, die die Experimentatoren lange Zeit hindurch stutzig machte, muss hier noch erwähnt werden. Wenn mit dem auf die Platte gestreuten Sand etwas feiner Staub vermischt ist — z. B. feiner Lyco-

podiumsamen — so bildet diese leichte Substanz, statt sich den Knotenlinien entlang zu legen, an den bewegtesten Stellen kleine Häufchen. Sie sind an den vier Ecken der Platte Fig. 74, an den vier Seiten der Platte Fig. 75 und zwischen den Knotenlinien der Platte Fig. 76 angehäuft. Diese drei Figuren stellen die drei Schwin-

Fig. 74. Fig. 75. Fig. 76.



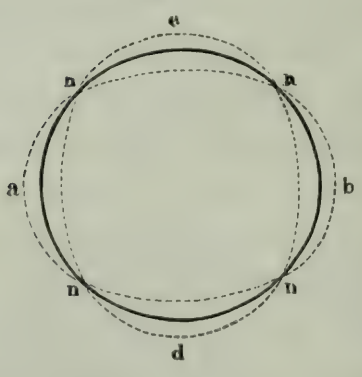
gungsstadien dar, die in Fig. 64, 65 und 66 abgebildet worden sind. Der Staub wählt sich immer den Ort der heftigsten Bewegung. Man hatte verschiedene Erklärungen für diese Erscheinung gegeben; Faraday war es aber vorbehalten, die äusserst einfache Ursache derselben zu finden. Das leichte Pulver wird von den kleinen Luftwirbeln, die die Schwingungen der Platte erzeugen, mitgerissen; es kann diesen kleinen Wirbelstürmen nicht entschlüpfen, obgleich die schwereren Sandtheilchen widerstandslos hindurchgetrieben werden. Hört daher die Bewegung auf, so sammelt sich das leichte Pulver in Häufchen an den Orten an, wo die Schwingung am stärksten war. Im luftleeren Raume wird diese Erscheinung nicht beobachtet; hier bewegen sich alle Pulver, die leichten wie die schweren, zu den Knotenlinien hin.

§. 11. Schwingung der Glocken: Mittel, um sie sichtbar zu machen.

Die schwingenden Theile und Knoten einer Glocke verhalten sich wie die der Scheibe. Lässt eine Glocke

ihren tiefsten Ton erklingen, so theilt sie sich durch die Interferenz ihrer Anstösse in vier schwingende Theile, die durch vier von dem Rande zum Knopfe der Glocke aufwärts gehende Knotenlinien von einander getrennt sind. Die Stelle, wo der Hammer anschlägt, ist immer die Mitte eines schwingenden Theiles; der diametral gegenüberliegende Punkt ist ebenfalls die Mitte eines solchen Theiles. Neunzig Grad von diesen Punkten haben wir ebenfalls schwingende Theile, während wir bei 45 Grad rechts und links von ihnen zu den Knotenlinien gelangen. Wenn wir annehmen, dass der starke dunkle Kreis in Fig. 77 den Umkreis einer Glocke im Zustande der Ruhe darstellt, so geht der Rand derselben, wenn der Hammer auf einen der Theile *a*, *c*, *b* oder *d* fällt, periodisch durch die mit punktirten Linien angegebenen Veränderungen. Einmal bildet die Glocke ein Oval mit *ab* als längstem Durchmesser; im nächsten Augenblicke ein Oval mit *cd* als längstem Durchmesser. Die Veränderungen von einem Oval zum anderen bilden in der That die Schwingungen der Glocke. Die vier Punkte *n*, *n*, *n*, *n*, wo die beiden Ovale sich schneiden, sind die Knoten. Wie bei einer Scheibe, so ist die Zahl der von einer Glocke in einer bestimmten Zeit ausgeführten Schwingungen ihrer Dicke direct proportional und ihrem Durchmesser umgekehrt proportional.

Fig. 77.



Wie die Scheibe kann sich auch die Glocke in jede beliebige gerade Zahl von schwingenden Theilen theilen, aber in keine ungerade Zahl. Dämpft man nach ein-

ander die geeigneten Punkte, so kann sich die Glocke in 6, 8, 10 und 12 schwingende Theile theilen. Fangen wir mit dem Grundton an, so ist die Schwingungszahl, die den resp. Theilungen einer Glocke oder einer Scheibe entspricht, folgende:

Zahl der Abtheilungen	4, 6, 8, 10, 12
Zahlen, deren Quadraten die Schwingungszahlen entsprechen	2, 3, 4, 5, 6.

Ist also die Schwingungszahl des Grundtones 40, so ist die des nächst höheren Tones 90, des nächsten 160, des nächsten 250, des nächsten 360 u. s. f. Glocken aus dünnem Metall theilen sich so leicht in mehreren Abtheilungen, dass es fast unmöglich ist, ihnen den reinen Grundton ohne Beimischung der höheren Töne zu entlocken.

Ich will jetzt einen einfachen, aber sehr lehrreichen Versuch vor Ihnen wiederholen. Streiche ich mit dem Violinbogen über den Rand dieses gewöhnlichen Kruges, so theilt er sich, genau wie die Glocke, in vier schwingende Theile. Der Krug hat einen Henkel, und ich bitte Sie, den Einfluss dieses Henkels auf den Ton zu beobachten. Streiche ich mit dem Violinbogen über den Rand an einem Punkte, der dem Henkel diametral entgegengesetzt ist, so hören Sie einen bestimmten Ton. Streiche ich an einem Punkte, der 90° vom Henkel entfernt ist, so hören Sie denselben Ton. Beide Male nahm der Henkel die Mitte des schwingenden Theiles ein, indem er diesen Theil durch sein Gewicht beschwerte. Wenn ich aber mit dem Bogen in einem Winkelabstande von 45° vom Henkel streiche, so ist der Ton bedeutend höher als vorher. Der Henkel befindet sich bei diesem Versuch an einem Knoten; er beschwert kein schwingendes Theilchen mehr, und daher erzeugt die elastische Kraft, die ein geringeres Gewicht zu bewegen hat, eine

schnellere Schwingung. Den hier mit einem Kruge gemachten Versuch führte Chladni mit einer Theetasse aus. Die Glocken sind oft an ihrem Rande ungleich dick, was dem Mangel an Symmetrie bei unserem Kruge entspricht. Wir werden später sehen, dass der auf und ab schwellende Ton vieler Glocken, den man besonders beim Verklingen des Tones beobachtet, von der Vereinigung zweier verschieden hoher Schwingungen erzeugt wird, die diesem Mangel an Gleichförmigkeit ihren Ursprung verdanken.

Es giebt keine Punkte absoluter Ruhe in einer schwingenden Glocke, denn die Knoten der höheren

Fig. 78.

Töne sind nicht die des Grundtones. Dass aber die verschiedenen Theile des Randes, wenn der Grundton vorherrscht, mit verschiedener Intensität schwingen, ist leicht zu beweisen. Wenn wir eine kleine Siegellackkugel *a* (Fig. 78) an einer Schnur aufhängen und sie leicht gegen die innere Fläche einer umgekehrten Glocke

aufliegen lassen, so wird sie, wenn die Glocke in Schwingungen versetzt wird, hin und her geschleudert. Das Rasseln der Siegellackkugel ist aber bei Weitem heftiger, wenn sie an den schwingenden Theilen, als wenn sie an den Knoten anliegt. Als ich die Elfenbeinkugel eines kurzen Pendels abwechselnd an den schwingenden Theil und an einen Knoten der grossen Glocke von Westminster hielt, wurde sie im ersteren Falle 12,05 cm, im zweiten nur etwa 6 cm weit fortgeschleudert, wenn der Hammer gegen die Glocke schlug.

Könnte die grosse Glocke umgekehrt und mit Wasser angefüllt werden, so würden ihre Schwingungen beim Anschlagen sich in schönen Kräuselungen auf der flüssigen Oberfläche offenbaren. Aehnliche Kräuselungen könnten wir durch kleinere Glocken erhalten, ja selbst durch meinen Finger und Weingläser; sie würden für meinen jetzigen Zweck aber zu klein sein. Ich fülle ein grosses, halbkugelförmiges Glas mit Wasser und streiche mit dem Violinbogen über seinen Rand; sogleich bedeckt sich seine Oberfläche mit Kräuselungen. Streiche ich kräftig mit dem Bogen, so erhebt sich das Wasser in einem lebhaften Sprühregen an den vier schwingenden Theilen. Ich werfe durch eine grosse Linse ein vergrössertes Bild der leuchtenden Wasseroberfläche auf den Schirm und streiche jetzt sanft mit dem Bogen über den Rand des Glases oder reibe mit meinem Finger leise den Rand; Sie hören diesen tiefen Ton, und beobachten zu gleicher Zeit die Wellen, die sich wie in sichtbarer Musik auf den vier Theilen der flüssigen Oberflächen kräuseln.

Der Versuch von Leidenfrost beweist, dass, wenn Wasser in ein rothglühendes silbernes Gefäss gegossen wird, es nicht plötzlich verdampft, sondern erst auf

seinem eigenen Dampfe hin und her rollt. Dasselbe geschieht, wenn wir eine flüchtige Flüssigkeit, wie Aether, auf die Oberfläche von heissem Wasser tropfen. Fülle ich eine Glasglocke mit Aether oder Alkohol, so löst ein scharfer Strich mit dem Bogen über den Rand der Glocke kleine kugelförmige Tröpfchen los, die sich beim Zurückfallen nicht mit der Flüssigkeit mischen, sondern wie auf Rädern von Dampf über die Oberfläche nach den Knotenlinien getrieben werden. Die Erwärmung der Flüssigkeit steigert die Wirkung, wie man sich denken kann. Herr Melde, dem wir diesen schönen Versuch verdanken, hat in den Zeichnungen Fig. 79 und Fig. 80

Fig. 79.

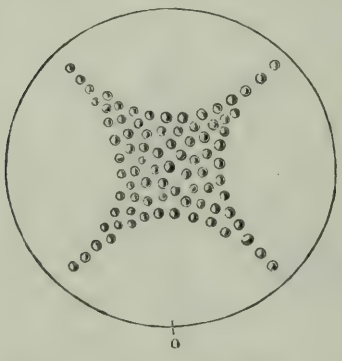
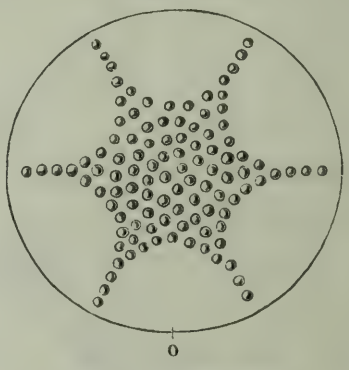


Fig. 80.



gezeigt, was geschieht, wenn sich die Oberfläche in vier oder in sechs schwingende Theile theilt. Wir können mit einem dünnen Weinglase und starkem Weingeist dieselbe Erscheinung erhalten [1]).

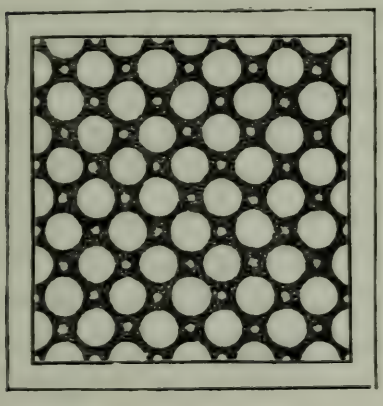
Das Glas und die darin enthaltene Flüssigkeit schwingen zugleich, und jede Störung des vollkommenen Zusammenhanges der ganzen Masse verhindert das Tönen.

[1]) Unter dem Absturz des Wetterhorns fand ich im Jahre 1867 einen Teich von klarem Wasser, in den ein Steinchen von der Spitze eines überhängenden Kalksteinfelsens fiel. Die zurückprallenden Wassertropfen, als sie wieder herunter fielen, rollten in Myriaden über die Oberfläche. Fast jeder Springbrunnen, dessen Sprühregen in ein Bassin fällt, wird dieselbe Wirkung zeigen.

Ginge ein Riss im Glase vom Rande abwärts, so würde es nicht mehr tönen. Eine Unterbrechung der Continuität der Flüssigkeit würde dasselbe bewirken. Wenn gegen ein Glas, das eine Lösung von kohlensaurem Natron enthält, mit einem Holzstück geschlagen wird, so hören Sie einen hellen, musikalischen Ton. Wenn aber etwas Weinsteinsäure zu der Flüssigkeit hinzukommt, so schäumt sie und ein trockenes, unmusikalisches Geräusch tritt an die Stelle des musikalischen Tones. Sowie der Schaum verschwindet, vermag das Gefäss von Neuem zu tönen, und jetzt, wo die Flüssigkeit wieder ungetrübt ist, hören Sie den Ton wie vorher.

Die Wellen der Fluth lassen ihren Eindruck auf dem Sande des Strandes zurück, über den sie spülen. Faraday hat gezeigt, dass die Kräuselungen, die durch tönende Schwingungen entstehen, sich ebenso aufzeichnen können. Befestigt man eine Glasplatte an einem langen biegsamen Brett und giesst eine dünne Schicht Wasser über die Oberfläche des Glases, so treiben seine Erschütterungen, wenn man das Brett schwingen lässt, das Wasser in ein schönes Mosaik von Kräuselungen. Eine dünne Schicht Sand, die auf die Platte gestreut ist, wird vom Wasser bewegt und bildet dabei ein Muster, von dem Fig. 81 ein verkleinertes Bild giebt.

Fig. 81.



Uebersicht der vierten Vorlesung.

Ein an beiden Enden befestigter, transversal schwingender Stab theilt sich ebenso, wie eine transversal schwingende Saite.

Indess ist die Reihenfolge seiner Obertöne nicht dieselbe, wie die der Saite; denn während die Tonreihe der Saite durch die natürliche Zahlenreihe 1, 2, 3, 4, 5 u. s. f. ausgedrückt wird, drücken die Quadrate der ungeraden Zahlen 3, 5, 7, 9 u. s. f. die Tonreihe des Stabes aus.

Ein an einem Ende befestigter Stab kann als Ganzes schwingen, oder er kann sich in schwingende Theile theilen, die von einander durch Knoten getrennt sind.

In diesem Falle verhält sich die Schwingungszahl des Grundtones zu der des ersten Obertones wie 4 : 25, oder wie das Quadrat von 2 zu dem Quadrat von 5. Von der ersten Theilung an aufwärts sind die Schwingungszahlen den Quadraten der ungeraden Zahlen 3, 5, 7, 9 u. s. f. proportional.

Bei Stäben von verschiedener Länge ist die Schwingungszahl dem Quadrat der Länge des Stabes umgekehrt proportional.

Befestigt man eine innen versilberte Glasperle an dem freien Ende des Stabes und beleuchtet die Perle, so beschreibt während der Schwingungen des Stabes der von ihr reflectirte Lichtpunkt verschieden gestaltete Curven. Das Kaleidophon von Wheatstone beruht hierauf.

Die Eisenvioline und die Spieldose sind Instrumente, deren Töne durch Stäbe oder Zungen erzeugt werden, die an dem einen Ende befestigt, an dem anderen frei sind.

Ein an beiden Enden freier Stab kann ebenfalls die Quelle von Tonschwingungen werden. Bei seiner einfachsten Theilungsart hat er zwei Knoten; die folgenden Obertöne entsprechen den Theilungen mit 3, 4, 5 u. s. f. Knoten. Fangen wir mit der ersten Theilungsart an, so werden die Schwingungszahlen der Töne eines solchen Stabes durch die Quadrate der ungeraden Zahlen 3, 5, 7, 9 u. s. f. gegeben.

Das Holzinstrument, die Strohfidel und die Glasharmonika sind Instrumente, deren Töne durch Stäbe oder Stangen erzeugt werden, die an beiden Enden frei sind und an den Knoten gestüzt werden.

Wenn ein gerader, an beiden Enden freier Stab allmählich in seiner Mitte gebogen wird, so nähern sich die dem Grundton entsprechenden beiden Knoten allmählich einander. Er nimmt zuletzt die Form einer Stimmgabel an, die, wenn sie ihren Grundton angiebt, durch zwei Knoten nahe der Basis ihrer Zinken in drei schwingende Theile getheilt wird.

Es giebt keine Theilung einer Stimmgabel durch drei Knoten.

Bei der zweiten Theilungsart, die dem ersten Obertone der Gabel entspricht, ist ein Knoten an jeder Zinke und zwei andere sind unten an der Gabel.

Die Schwingungszahl des Grundtones der Gabel verhält sich annähernd zu derjenigen ihres ersten Obertones wie das Quadrat von 2 zu dem Quadrat von 5. Daher erfolgen die Schwingungen des ersten Obertones ungefähr $6^1/_4$ mal so häufig als die des Grundtones. Von dem ersten Oberton an aufwärts verhalten sich die auf einander folgenden Schwingungszahlen wie die Quadrate der ungeraden Zahlen 3, 5, 7, 9 u. s. f.

Chladni verdanken wir die experimentelle Untersuchung aller dieser Verhältnisse. Er benutzte dabei seine Entdeckung, dass Sand, der auf eine schwingende Oberfläche gestreut ist, von den schwingenden Theilen derselben fortgetrieben wird und sich auf den Knotenlinien ansammelt.

Chladni dehnte seine Untersuchungen auf Platten von verschiedener Gestalt aus. Eine quadratische Platte z. B., die in der Mitte eingeklemmt ist und ihren Grundton angiebt,

theilt sich durch Linien, die ihren Seiten parallel sind, in vier kleinere Quadrate.

Dieselbe Platte kann sich in vier dreieckige schwingende Theile theilen, wobei dann die Knotenlinien mit den Diagonalen zusammenfallen. Der so erzeugte Ton liegt eine Quinte über dem Grundton der Platte.

Die Platte kann sich noch weiter theilen, wobei Sandfiguren von ausserordentlicher Schönheit entstehen. Der Ton wird um so höher, je kleiner die Abtheilungen der Platte sind.

Diese Figuren kann man aus der Vereinigung verschiedener Schwingungssysteme ableiten.

Giebt eine in ihrem Mittelpunkte festgeklemmte, kreisförmige Platte ihren Grundton an, so theilt sie sich in vier schwingende Theile, die von einander durch vier radiale Knotenlinien getrennt sind.

Der folgende Ton der Platte entspricht einer Theilung in sechs schwingende Sectoren, der darauf folgende einer Theilung in acht Sectoren. Eine solche Platte kann sich in jede gerade Zahl schwingender Sectoren zerlegen. Die Sandfiguren nehmen sehr schöne, sternartige Formen an.

Die Schwingungszahlen, welche den auf einander folgenden Theilungen einer Scheibe entsprechen, werden durch die Quadrate der Zahlen 2, 3, 4, 5, 6 u. s. f. ausgedrückt. Es sind also die Schwingungszahlen den Quadraten der Zahlen der Sectoren proportional, in die sich die Scheibe theilt.

Giebt eine Glocke ihren tiefsten Ton, so ist sie dabei in vier schwingende Theile getheilt, die von einander durch Knotenlinien getrennt sind, welche von dem Rande aufwärts gehen und sich in dem Knopfe der Glocke kreuzen.

Sie kann sich, wie die Scheibe, auch in mehrere Abtheilungen theilen; die Reihenfolge ihrer Obertöne ist ebenfalls dieselbe.

Die Zahl der Schwingungen einer Scheibe oder Glocke ist der Dicke direct proportional und dem Quadrat des Durchmessers umgekehrt proportional.

Fünfte Vorlesung.

Längsschwingungen eines Drahtes. — Schallgeschwindigkeit in Messing und Eisen. — Längsschwingungen eines Stabes, der an einem Ende befestigt ist, und eines Stabes, dessen beide Enden frei sind. — Knotenpunkte und Obertöne der longitudinal schwingenden Stäbe. — Beobachtung schwingender Stäbe mit polarisirtem Lichte. — Schallgeschwindigkeit in festen Körpern. — Resonanz. — Schwingungen in gedackten Pfeifen; deren Abtheilungen und Obertöne. — Wie sich die Töne gedackter Pfeifen zu denen offener Pfeifen verhalten. — Zustand der Luftsäule in einer tönenden Orgelpfeife. — Zungen und Zungenpfeifen. — Das Stimmorgan. — Obertöne der Stimmbänder. — Die Klänge der Vocale. — Telephon, Mikrophon und Phonograph. — Kundt's Versuche. — Neue Methoden, um die Geschwindigkeit des Schalles zu bestimmen.

---

§. 1. Längsschwingungen von Drähten und Stäben: Verwandlung von Längsschwingungen in Querschwingungen.

Wir haben uns bisher ausschliesslich mit Querschwingungen beschäftigt; das heisst mit Schwingungen, deren Richtung zur Länge der beobachteten Saiten, Stäbe, Platten und Glocken einen rechten Winkel bildete. Eine Saite kann auch in der Richtung ihrer Länge schwingen; dann aber ist die Kraft, welche die Schwingungen verursacht, nicht die von aussen gegebene Spannung, sondern die elastische Kraft zwischen ihren eigenen Molekeln. Nun ist diese Elasticität der Molekeln

viel bedeutender als irgend eine, die wir durch Spannung der Saite erzeugen können, und in Folge dessen sind die durch Längsschwingungen der Saite hervorgebrachten Töne in der Regel viel höher, als die durch ihre Querschwingungen erzeugten. Diese Längsschwingungen können hervorgerufen werden, indem man mit einem Violinbogen schräg über die Saite hinstreicht. Leichter noch erhält man sie, wenn man ein Stück Tuch oder Leder oder die Finger mit etwas Colophoniumpulver einreibt und damit schnell an der Saite auf und ab fährt.

Ziehe ich den Draht unseres Monochords zur Seite, so hören Sie den Ton, der durch seine Querschwingungen erzeugt ist. Reibe ich nun mit dem eingeharzten Leder am Drahte entlang, so lässt sich ein viel durchdringenderer Ton hören als der frühere; dieser rührt von den Längsschwingungen des Drahtes her. Hinter dem Tische ist ein 6,90 m langer starker Eisendraht ausgespannt. Das eine Ende ist unbeweglich an einem starken hölzernen Gestell befestigt, das andere Ende ist um einen Stift gewickelt, der fest in einer unserer Bänke steckt. Mit einem Schlüssel kann der Stift gedreht und der Draht gespannt werden, um das Streichen mit dem Lappen zu erleichtern. Fasse ich den Draht mit dem harzigen Leder und fahre mit der Hand daran auf und ab, so hören Sie einen lauten und vollen musikalischen Ton. Fasse ich nun den Draht fest in der Mitte und reibe eine seiner Hälften, so ist der gehörte Ton eine Octave höher als der vorige, indem die Schwingungen doppelt so schnell geworden sind. Fasse ich den Draht an einem Drittel seiner Länge und reibe die kürzere Abtheilung, so ist dieser Ton noch eine Quinte höher als die Octave. Kürze ich den Draht um

ein Viertel seiner Länge und reibe dieses Viertel, so ist der Ton zwei Octaven höher als der vom ganzen Draht gegebene, indem er der vierfachen Anzahl von Schwingungen entspricht. Also steht sowohl bei Längs- als auch bei Querschwingungen die Zahl der Schwingungen in umgekehrtem Verhältniss zur Länge des Drahtes.

Achten Sie nun auf die überraschende Kraft dieser Töne, wenn der Draht heftig gerieben wird. Ich fasse ihn kürzer, der Ton steigt; noch kürzer und er wird so hoch und zugleich so mächtig, dass er fast unerträglich ist. Nicht der Draht selbst giebt diesen durchdringenden Ton ab, sondern das hölzerne Gestell an seinem Ende, dem er die Schwingungen mittheilt. Da die Schwingungen des Drahtes Längsschwingungen sind, müssen die des Brettes, welches rechtwinklig zu dem Drahte steht, Querschwingungen sein. So haben wir hieran in der That ein anschauliches Beispiel der Verwandlung von Längsschwingungen in Querschwingungen.

§. 2. Longitudinale Stösse in Eisen und Messing; ihre relativen Geschwindigkeiten.

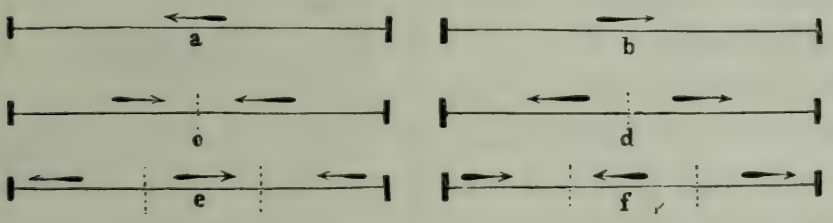
Ich lasse den Draht nun wieder seiner ganzen Länge nach schwingen, während mein Assistent den Schlüssel dreht und dadurch die Spannung ändert. Sie bemerken keine Veränderung des Tones. Die Längsschwingungen unterscheiden sich darin von den Querschwingungen, dass sie von der Spannung unabhängig sind. Neben dem Eisendraht befindet sich ein Messingdraht von derselben Länge und Dicke. Ich reibe sie

beide und ihre Töne sind nicht gleich, sondern der des eisernen Drahtes ist bedeutend höher als der andere. Warum? Einfach, weil die Schnelligkeit der Tonwellen im Eisen grösser ist als im Messing. Die Impulse gehen in diesem Falle von einem Ende des Drahtes zum anderen hin und her. Einmal drängt der Draht gegen das Brett an seinem Ende, das andere Mal zieht er daran. Dieses Anprallen und Zerren rührt her von dem Auf- und Ablaufen des Impulses durch den ganzen Draht. Die Zeit, welche derselbe braucht, um von einem Ende zum anderen und zurück zu laufen, entspricht einer ganzen Schwingung. Während dieser Zeit übt der Draht einen Stoss und einen Zug auf das Brett aus; das Brett theilt der Luft eine ganze Schwingung mit, und die Luft drängt das Trommelfell einmal nach innen und einmal nach aussen. Hiernach ist klar, dass die Schnelligkeit der Schwingung, oder mit anderen Worten die Höhe des Tones, von der Geschwindigkeit abhängt, mit welcher die Tonwelle durch den Draht geht.

Nun bietet sich uns hier die Lösung einer interessanten Aufgabe ganz von selbst. Wir verkürzen den Messingdraht, bis der Ton, den er von sich giebt, ebenso hoch ist wie der des anderen Drahtes. Wie Sie hören, sind beide Töne jetzt im Einklang; ein Beweis, dass die Tonwelle durch diese 4,65 m Messingdraht in derselben Zeit wie durch diese 6,90 m Eisendraht geht. Diese Längen stehen ungefähr im Verhältniss von 11 : 17; diese beiden Zahlen ergeben also die relative Schallgeschwindigkeit in Messing und Eisen. Die erstere Geschwindigkeit beträgt in der That 3300 m (300 × 11) und die letztere 5100 m (300 × 17) in der Secunde. Natürlich lässt sich dieselbe Methode auch bei vielen anderen Metallen anwenden.

Wenn ein Draht in Folge von Längsschwingungen seinen tiefsten Ton giebt, so hat er keinen Knotenpunkt. Die Welle läuft, wie gesagt, an der ganzen Länge des Drahtes auf und ab. Er kann aber auch wie eine querschwingende Saite in schwingende Abschnitte getheilt werden, die durch Knoten getrennt sind. Wenn wir den Draht in der Mitte dämpfen, so bildet sich an dieser Stelle ein Knotenpunkt. Die Wellen laufen hier von beiden Enden aus, begegnen sich in der Mitte, prallen von einander ab und kehren zu den Enden zurück, wo sie, wie vorher, reflectirt werden. Der Ton, der nun durch den in zwei schwingende Theile getheilten Draht erzeugt wird, ist die Octave des Grundtones. Der nächst höhere Ton wird erzeugt, wenn man den Draht in drei schwingende Theile theilt. Die erste dieser drei Schwingungsweisen wird in Fig. 82 unter *a* und *b* gezeigt, die

Fig. 82.



zweite unter *c* und *d*, die dritte unter *e* und *f*. Die Knoten sind durch punktirte Querstriche angegeben und die Richtung der Impulse wird durch Pfeile bezeichnet. Die Schwingungsperioden folgen, gerade wie bei den querschwingenden Drähten, der Zahlenreihe 1, 2, 3, 4, 5 u. s. w.

Ein Stab aus Holz oder Metall, dessen beide Enden befestigt sind und der in Längsschwingungen versetzt wird, lässt sich ebenso abtheilen wie der Draht. Auch ist die Folge der Töne in beiden Fällen die gleiche.

§. 3. Longitudinalschwingungen von Röhren, die an einem Ende befestigt sind; Musikinstrumente, die nach diesem Princip construirt sind.

Stäbe, die an einem Ende befestigt sind, können ebenfalls Längsschwingungen ausführen. So giebt z. B. ein glatter Holz- oder Metallstab, dessen eines Ende in einen Schraubstock geklemmt ist, einen musikalischen Ton, wenn man mit harzigen Fingern an ihm entlang streicht. Wenn ein solcher Stab seinen tiefsten Ton giebt, spannt und verkürzt er sich in raschem Wechsel. Dann besteht kein Knoten auf dem Stabe. Die Tonhöhe steht immer im umgekehrten Verhältniss zur Länge des Stabes. Dies folgt nothwendig aus der Thatsache, dass eine ganze Schwingung so viel Zeit erfordert, als der Impuls braucht, um zweimal am Stabe auf und ab zu laufen. Der erste Oberton eines Stabes mit freiem Ende entspricht einer Eintheilung, bei welcher sich der Knotenpunkt in einem Abstande von dem freien Ende befindet, der ein Drittel der Stablänge beträgt. Sein zweiter Oberton entspricht einer Theilung durch zwei Knoten, deren höchster ein Fünftel der ganzen Länge des Stabes vom freien Ende abschneidet, während der andere Knoten den übrigen Stab in zwei gleiche Theile theilt. Fig. 83 zeigt unter a und b, c und d, e und f den Zustand des Stabes, welcher diesen drei ersten Schwingungsweisen entspricht. Die Knoten sind wie oben durch punktirte Linien bezeichnet, und die Pfeile geben jedesmal die Richtung der schwingenden Bewegung an.

Die Töne eines Stabes, der an einem Ende festgeklemmt ist und Längsschwingungen ausführt, stehen im Verhältniss der ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 u. s. w.; und es begreift sich leicht, warum dies der Fall ist. Denn das Zeitmass für die Schwingungen von *c* oder *d* bestimmt der Theil über der punktirten Linie, und da dieser nur ein Drittel so lang ist als der ganze Stab, müssen seine Schwingungen dreimal so schnell sein. Bei *e* oder *f* ist der Ton ebenfalls gleich dem Grundton des obersten Abschnittes, und da dieser Abschnitt ein Fünftel so lang ist als der ganze Stab, so müssen seine Schwingungen fünfmal so schnell sein. Demnach muss die Reihenfolge der Töne der der ungeraden Zahlen entsprechen.

Fig. 83.

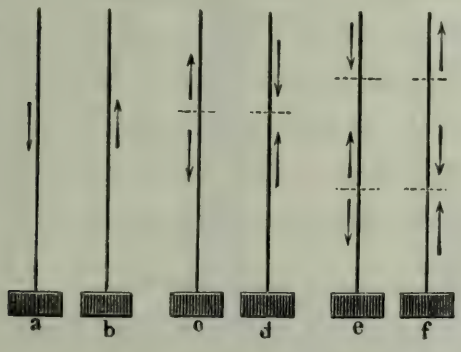
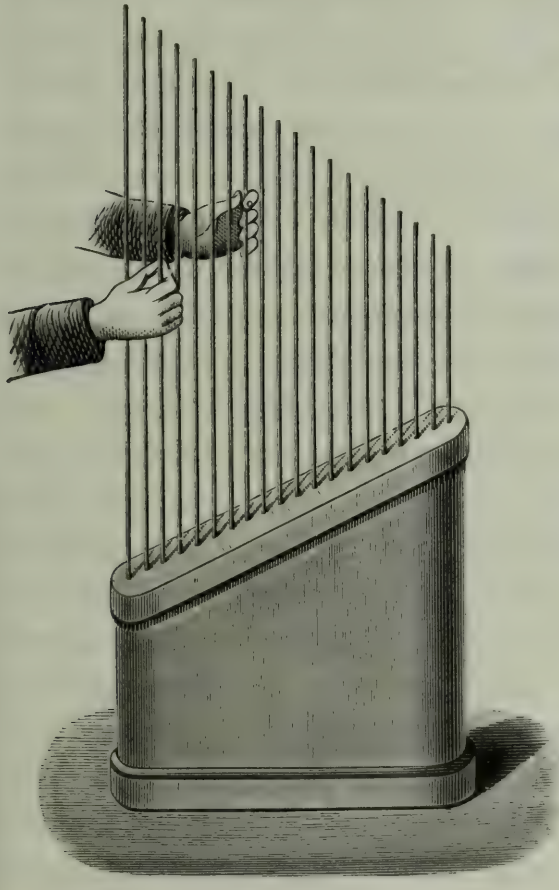


Fig. 84.



Sie haben in Fig. 84 ein musikalisches

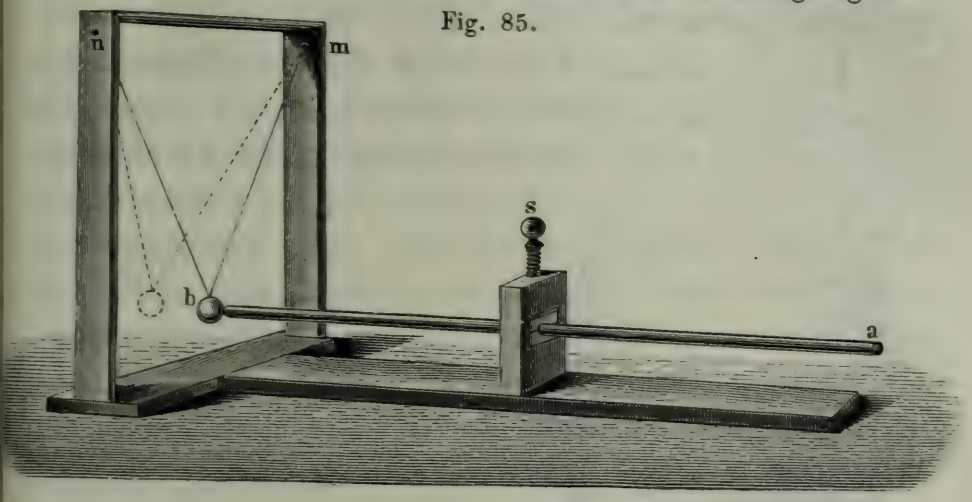
Instrument vor sich, dessen Töne durch die longitudinalen Schwingungen einer Reihe verschiedenen langer Stäbe aus Tannenholz erzeugt werden. Wenn ich mit harzigen Fingern der Reihe nach die Stäbe streiche, erhalte ich eine Folge von Tönen verschiedener Höhe. Es würde allerdings eines viel gewandteren Spielers bedürfen, als ich es bin, um Ihnen die Töne dieses Instrumentes einigermassen angenehm zu machen.

§. 4. Schwingungen von Stäben, die an beiden Enden frei sind.

Auch Stäbe, deren beide Enden frei sind, können Längsschwingungen ausführen und musikalische Töne hervorbringen. Die Untersuchung dieses Gegenstandes wird uns zu ausserordentlich wichtigen Resultaten führen. Ich fasse mit der linken Hand eine lange Glasröhre gerade in der Mitte und reibe die eine Hälfte mit einem nassen Tuche. Dadurch entsteht ein klarer musikalischer Ton. Ein massiver Glasstab derselben Länge würde denselben Ton geben. In diesem Falle befindet sich der Knoten in der Mitte der Röhre, und die beiden Hälften werden abwechselnd länger und kürzer. König aus Paris hat mir ein Instrument geliefert, welches diesen Vorgang veranschaulicht. Ein Messingstab *ab* (Fig. 85) wird in der Mitte von der Klemme *s* gehalten, und eine Elfenbeinkugel, die an zwei Fäden von den Punkten *m* und *n* am Holzrahmen herabhängt, berührt das Ende *b* des Messingstabes. Wenn ich sanft mit eingeharztem Leder bei *a* an dem Stabe entlang streiche, wird er in Längsschwingungen versetzt. Die Mitte *s* ist ein Knoten; aber die Unruhe der Elfenbeinkugel zeigt Ihnen, dass das Ende *b* in

einer zitternden Bewegung ist. Ich reibe schneller. Die Kugel *b* klappert, und zuletzt wird die Schwingung so

Fig. 85.



stark, dass die Kugel mit Heftigkeit zurückgestossen wird, so oft sie mit dem Stabe in Berührung kommt.

§. 5. Zerspringen einer Glasröhre durch Schallschwingungen.

Wenn ich mit dem nassen Tuche über die Fläche dieser Glasröhre reibe, kann ich bemerken, wie das Häutchen von Flüssigkeit, das hinter dem Tuche zurückbleibt, schmale zitternde Ringe auf dem ganzen Stabe bildet. Dieses Zittern der Flüssigkeit rührt von dem Zittern des Glases darunter her, und man kann sogar die Heftigkeit der Schwingung so steigern, dass das Glas factisch in Stücke bricht. Savart war der Erste, der dies zeigte. Ich habe diesen Versuch hier schon zweimal wiederholt und dabei jedesmal eine schöne 1,18 m lange und 5 cm breite Glasröhre geopfert. Ich fasste die Röhre in der Mitte *C* (Fig. 86 a. f. S.) und rieb heftig die eine Hälfte *CD*, bis schliesslich die andere Hälfte der Röhre in ringförmige Stücke zersprang. Trotz der

Schmalheit dieser Stücke zeigten sich daran bei der Untersuchung ringförmige Sprünge, die noch kleinere Abtheilungen andeuteten.

Auch in diesem Falle steht die Schnelligkeit der Schwingung im umgekehrten Verhältniss zur Länge des Stabes. Ein Stab von der halben Länge führt seine Längsschwingungen mit der doppelten, ein Stab von einem Drittel der Länge mit der dreifachen Geschwindigkeit aus u. s. f. Da die Dauer einer ganzen Schwingung von der Zeit abhängt, die die Welle braucht, um am Stabe auf und ab zu laufen, und da diese Zeit in geradem Verhältniss zur Länge des Stabes steht, so muss natürlich die Schnelligkeit der Schwingung der Länge des Stabes umgekehrt proportional sein.

Fig. 86.

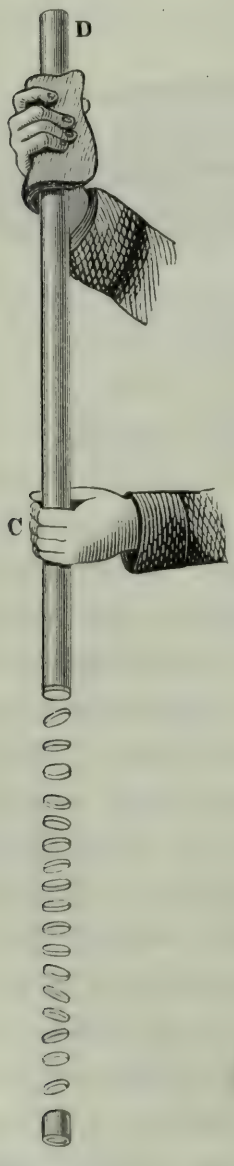
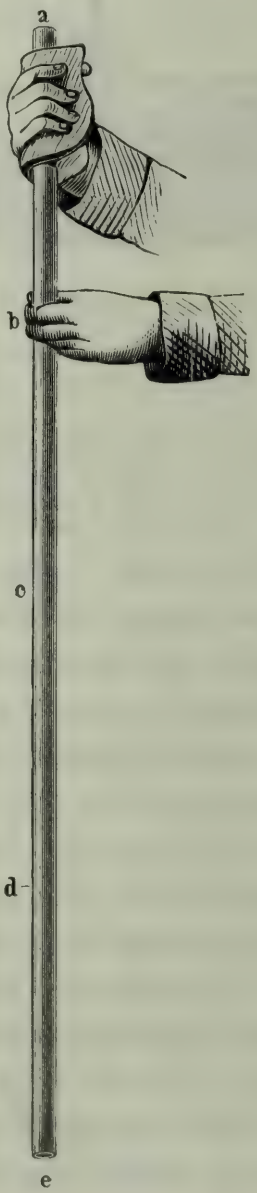


Fig. 87.

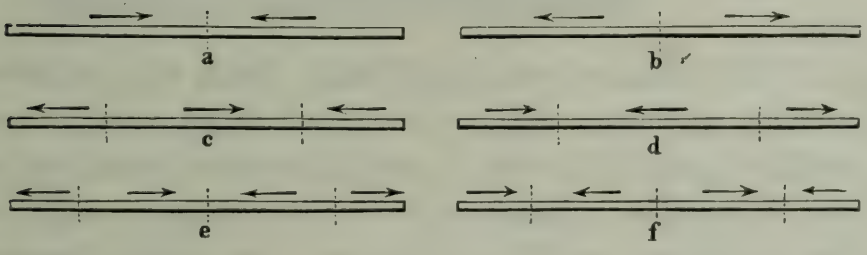


Diese Theilung durch einen einzigen Knoten in der Mitte entspricht

dem tiefsten Tone, den der Stab bei Längsschwingungen geben kann. Doch wie bei allen bisher untersuchten Fällen können solche Stäbe noch ferner getheilt werden. Ich fasse den langen Glasstab *ae* (Fig. 87) bei dem Punkte *b*, der in der Mitte zwischen dem einen Ende und dem Mittelpunkte des Stabes liegt, und reibe den kurzen Theil *ab* mit einem nassen Tuch. Der Punkt *b* bildet einen Knoten, und ihm entsprechend entsteht in derselben Entfernung vom anderen Ende des Stabes ein zweiter Knoten bei *d*. Somit haben wir den Stab in drei schwingende Theile getheilt, einen ganzen Schwingungsbauch *bd* in der Mitte und zwei halbe *ab* und *de*. Der Ton, welcher dieser Theilung des Stabes entspricht, ist die Octave seines Grundtones.

Sie können nun meine Aussagen zusammenhalten und prüfen. Denn wenn ein so getheilter Stab die Octave des Grundtones giebt, und ein Stab, der halb so lang ist, dieselbe Octave giebt, so müsste der ganze Stab, wenn man ihn bei einem Viertel seiner Länge

Fig. 88.



fasst, denselben Ton geben, als der halb so lange Stab, wenn man ihn in der Mitte fasst. Lässt man beide Töne gleichzeitig erklingen, so zeigt sich, dass sie gleich hoch sind.

In Fig. 88 sind unter *a* und *b*, *c* und *d*, *e* und *f* die drei ersten Theilungsweisen eines Stabes gezeigt,

der an beiden Enden frei ist und Längsschwingungen ausführt. Die Knoten sind, wie früher, durch punktirte Querlinien, und die Richtung der Schwingungen durch Pfeile angegeben. Die Folge der Töne ist ausgedrückt in den Zahlen 1, 2, 3, 4 u. s. w.

§. 6. Wirkung von Schallschwingungen auf polarisirtes Licht.

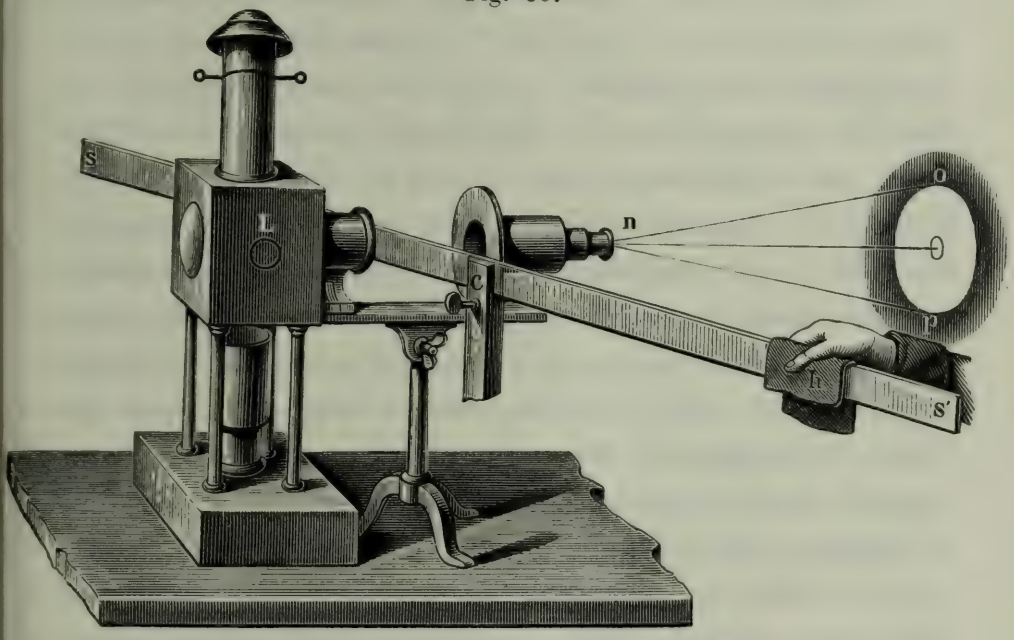
Wenn ein Stab, der sich in Längsschwingungen befindet, seinen Grundton giebt, sind seine beiden Enden ungehindert in ihren Schwingungen; das Glas erleidet an dieser Stelle weder Druck noch Dehnung. In der Mitte ist es gerade umgekehrt; hier findet keine Bewegung statt, dagegen ein rascher Wechsel von Dehnung und Druck. Wenn die Tonimpulse gegen die Mitte hin drängen, so pressen sie das Glas zusammen; wenn sie zurückprallen, so dehnen sie es. So haben wir also an den Enden die grösste Schwingung, aber keinen Wechsel der Dichtigkeit, dagegen in der Mitte die grösste Veränderung der Dichtigkeit, aber keine Schwingung.

Wir haben uns nun den Weg zu einem sehr schönen Versuch geebnet, welcher vor einer Reihe von Jahren von Biot gemacht, aber, so viel ich weiss, noch nie in dem Maassstabe wiederholt wurde, in dem ich ihn Ihnen hier vorführen werde. Ich lasse das Licht unserer elektrischen Lampe L (Fig. 89) durch ein Nicol'sches Prisma B fallen und erhalte dadurch einen Strahl polarisirten Lichtes. Dieser Strahl stösst auf ein zweites Prisma n; allein, obgleich beide Prismen vollkommen undurchsichtig sind, kann das Licht, welches durch das erste Prisma hindurchgegangen ist, nicht durch das

zweite Prisma dringen. Wenn ich aber ein Stück Glas zwischen die beiden Prismen bringe und es einem Druck oder einer Dehnung in geeigneter Richtung unterwerfe, so wird das Licht in Stand gesetzt, das Ganze zu durchdringen.

Ich bringe zwischen die Prismen B und n ein Rechteck von Spiegelglas, welches 1,80 m lang, 5 cm

Fig. 89.



breit und 0,8 cm dick ist und versetze es in Längsschwingungen. Der Strahl aus L trifft das Glas nahe bei seinem Mittelpunkte, der von einem Schraubstock c gehalten wird; wenn eine der Hälften cs mit einem nassen Tuche gerieben wird, so muss die Mitte des Glasstreifens ein Knotenpunkt sein. Während der Längsschwingungen wird, wie schon gesagt, das Glas in der Mitte abwechselnd gedehnt und gepresst. Dadurch erleidet es die Veränderung seiner Structur, die es fähig macht, jene Beschaffenheit des Lichtes aufzuheben, vermöge welcher dieses nicht durch das zweite Prisma n

gelangen kann. Der Schirm ist ganz dunkel; ich reibe mit meinem nassen Tuche schnell über das Glas. Sie hören seinen Ton, und gleichzeitig leuchtet eine strahlende Lichtscheibe von 90 cm Durchmesser auf dem Schirm auf. So schnell als die Schwingung sich legt, verschwindet auch das Licht, um sich jedoch nach Belieben durch das nasse Tuch wieder hervorrufen zu lassen.

Das Licht auf dem Schirm scheint beständig zu sein, aber in der That ist es unterbrochen, denn es kann nur durchdringen, wenn Druck oder Dehnung auf das Glas ausgeübt wird. Bei dem Uebergang von Dehnung zu Druck und von Druck zu Dehnung ist das Glas einen Augenblick in seinem natürlichen Zustande, der, wenn er andauerte, den Schirm dunkel lassen würde. Allein auf der Netzhaut des Auges haftet der Eindruck der Helligkeit, der durch Druck und Dehnung hervorgerufen wird, viel länger als nöthig ist, um die Zwischenräume von Dunkelheit ganz verschwinden zu lassen. Daher scheint der Schirm von einem ununterbrochenen Lichte erleuchtet. Nun stelle ich das Rechteck von Glas so, dass der polarisirte Strahl nahe bei dem Ende *s* darauf fällt. Die Längsschwingungen haben jetzt nicht den geringsten Einfluss auf den polarisirten Strahl. So können wir mit Hülfe dieses feinen Beobachtungsmittels nachweisen, dass die Mitte des Glases, wo die Schwingung gleich Null ist, schneller Abwechslung von Dehnung und Druck unterworfen ist, während die Enden des Rechtecks, wo die Schwingung am stärksten ist, weder Druck noch Dehnung erleiden [1]).

---

[1]) Der Versuch lässt sich beinahe ebenso gut mit einer Glasröhre ausführen. Die farbigen Ringe einer concaven Selenitplatte können durch ein tönendes Stück Glas umgekehrt werden.

§. 7. Schwingungen von Holzstäben; relative Geschwindigkeiten des Schalls in verschiedenen Holzarten.

Holz- und Metallstäbe geben auch musikalische Töne, wenn sie in Längsschwingungen versetzt werden. Jedoch ist hierbei der angewendete Reiber nicht ein nasses Tuch, sondern ein Stück Leder, das mit Colophoniumpulver bestreut ist. Reiben mit harzigen Fingern bringt ebenfalls die Stäbe zum Tönen. Ihre Schwingungsart ist die schon gezeigte, doch ändert sich die Tonhöhe mit der Geschwindigkeit, mit der die Tonwelle durch die verschiedenen Substanzen geht. Wenn ein Stab aus Tannenholz und ein Stab aus spanischem Mahagoni, beide von gleicher Länge, gleichzeitig tönen, so giebt der eine einen viel tieferen Ton als der andere. Warum? Einfach weil die Tonwellen durch diese besondere Art von Mahagoni langsamer gehen als durch Tannenholz. Das Verhältniss der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in diesen beiden Körpern können wir mit der grössten Leichtigkeit feststellen. Wir brauchen nur den Mahagonistab zu verkürzen, bis er denselben Ton giebt, wie der Stab aus Tannenholz. Nach mehrfachen Versuchen hören Sie, wie die beiden Töne immer näher zusammen kommen, bis sie schliesslich identisch geworden sind. Durch diesen 1,20 m langen Mahagonistab und durch diesen 1,80 m langen Tannenstab geht die Tonwelle in derselben Zeit; also drücken diese Zahlen das Verhältniss der Schallgeschwindigkeit in den beiden Substanzen aus.

Untersuchungsweisen, die ich in unseren früheren Vorlesungen nur andeuten konnte, bieten sich uns nun

ganz von selber dar. Als ich in meiner ersten Vorlesung von der Geschwindigkeit des Schalls in der Luft sprach, werden Ihnen ohne Zweifel mancherlei Methoden eingefallen sein, diese Geschwindigkeit zu bestimmen, weil es sich hier um meilenlange Strecken handelte. In Holz und Metall, wo solche Entfernungen ausgeschlossen sind, wird die Schallgeschwindigkeit nach der oben geschilderten einfachen Methode bestimmt. Aus den Tönen, die sie aussenden, wenn sie auf geeignete Weise zubereitet sind, können wir mit Sicherheit auf das Verhältniss der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen festen Substanzen schliessen; und wenn wir das Verhältniss der Geschwindigkeit in einem dieser Körper mit der Geschwindigkeit in der Luft vergleichen, so können wir eine Tabelle absoluter Geschwindigkeiten aufstellen. Aber wie bringen wir die Luft in diese Reihe? Bald werden wir im Stande sein, diese Frage zu beantworten, indem wir uns ihr mittelst einer Reihe von Erscheinungen nähern, die beim ersten Anblick allerdings nicht damit in Zusammenhang zu stehen scheinen.

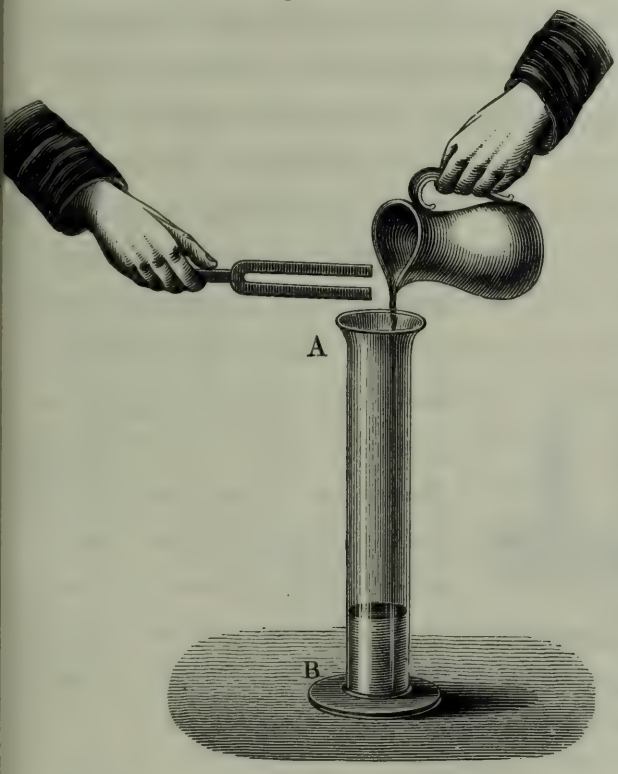
Resonanz.

§. 8. Versuche mit resonirenden Gefässen. Analyse und Erklärung.

Vor Ihnen steht eine Reihe von Stimmgabeln, deren Schwingungszahlen schon durch die Sirene bestimmt wurden. Eine derselben schwingt, wie Sie wissen, 256 mal in der Secunde und die Länge der Tonwelle, die sie erzeugt, beträgt daher 1,30 m. Die Gabel ist nun von ihrem Kasten abgenommen, so dass man sie kaum hört, wenn sie angeschlagen wird. Ich halte die

schwingende Gabel über das Glasgefäss AB (Fig. 90), welches 45 cm tief ist; aber Sie hören den Ton der Gabel noch immer nicht. Während ich die Gabel in ihrer Stellung lasse, giesse ich möglichst geräuschlos Wasser in das Gefäss. Die Luftsäule unter der Gabel wird kürzer, indem das Wasser steigt. Sie bemerken, dass der Ton zunimmt, und wenn das Wasser eine gewisse Höhe erreicht hat, schwillt er zu bedeutender Stärke an. Steigt das Wasser noch höher, so nimmt der Ton ab, bis er endlich ebenso unhörbar wird wie zuvor. Wenn ich das Wasser vorsichtig ausgiesse, erreiche ich wieder den Punkt, wo die Verstärkung des Tones eintritt. Durch solche Versuche ergiebt sich, dass der Ton der Stimmgabel nur bei einer ganz bestimmten Länge der darunter befindlichen Luftsäule den höchsten Grad seiner Stärke erreicht. Diese Verstärkung des Tones wird Resonanz genannt.

Fig. 90.



Wenn ich in derselben Weise der Reihe nach mit allen Gabeln verfahre, finde ich für jede eine Luftsäule, welche ihr die stärkste Resonanz giebt. Die Luftsäulen werden in dem Maasse kürzer, als die Geschwindigkeit

der Schwingung wächst. In Fig. 91 ist die Reihe von Gefässen abgebildet und die Zahl der Schwingungen, für welche jedes resonirt, darüber geschrieben.

Es fragt sich nun, was der physikalische Sinn dieser höchst wunderbaren Thatsache ist. Um diese Frage zu beantworten, müssen wir uns erinnern, in welcher Beziehung die Bewegung der Gabel zur Bewegung der von ihr erzeugten Tonwelle steht. Nehmen wir an, dass eine Zinke der Stimmgabel, welche 256 Schwingungen in der Secunde ausführt, zwischen den Punkten *a* und *b* (Fig. 92) vibrirt. Bei ihrer Bewegung von *a* zu *b* erzeugt die Gabel eine halbe Tonwelle und da die Länge der ganzen Tonwelle dieser Gabel 1,30 m beträgt, so ist in dem Augenblicke, wo die Zinke *b* er-

Fig. 91.

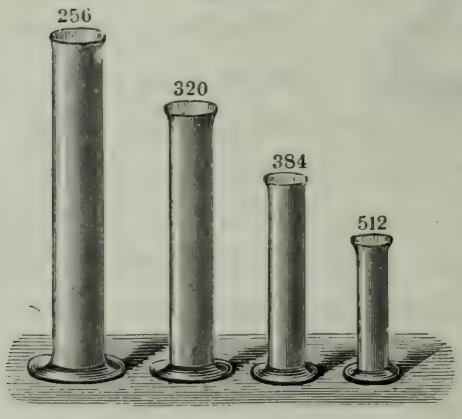
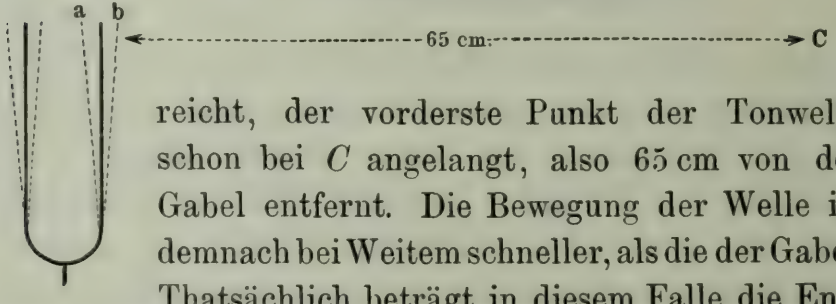


Fig. 92.



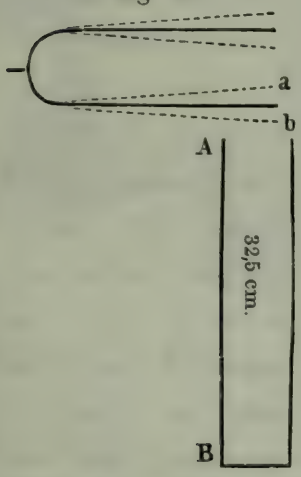
reicht, der vorderste Punkt der Tonwelle schon bei *C* angelangt, also 65 cm von der Gabel entfernt. Die Bewegung der Welle ist demnach bei Weitem schneller, als die der Gabel. Thatsächlich beträgt in diesem Falle die Entfernung *ab* nicht mehr als 0,12 cm, und in der Zeit, welche die Gabel braucht, diesen Raum zu durchlaufen, macht die Tonwelle einen Weg von 65 cm. Bei tieferen Stimmgabeln würde der Unterschied noch grösser sein.

Die Luftsäule, bei welcher diese zweite Gabel am stärksten resonirt, ist 32,5 cm. Die Länge der Tonwelle

aber, welche die Gabel erzeugt, beträgt 1,30 m. Also: Die Länge der Luftsäule, welche auf den Ton der Gabel resonirt, ist gleich einem Viertel der Länge der Tonwelle, welche von der Gabel ausgeht. Diese Regel ist allgemein und könnte durch jede andere dieser Gabeln bestätigt werden.

Denken Sie sich also die Zinke zwischen *a* und *b* hin- und herschwingend, und über ihr das Resonanzgefäss *AB* (Fig. 93). In der Zeit, welche die Gabel braucht, um von *a* zu *b* zu gelangen, geht die Verdichtung der Luft, die sie hervorbringt, bis auf den Boden des Gefässes nieder, wird hier reflectirt und, da die Entfernung bis zum Boden und wieder zurück 65 cm beträgt, so wird die reflectirte Welle die Gabel in dem Augenblicke erreichen, wo sie im Begriff steht, wieder von *b* zu *a* zurückzukehren. Durch die Rückbewegung der Zinke von *b* zu *a* entsteht die Luftverdünnung der Welle. Diese Verdünnung wird ebenfalls bis zum Boden des Gefässes und wieder zurücklaufen und die Zinke einholen, wenn sie gerade die Grenze ihrer Excursion *a* erreicht hat. Aus dieser Analyse ist klar, dass die Schwingungen der Gabel vollkommen gleichzeitig mit den Schwingungen der Luftsäule *AB* verlaufen, und in Folge dieser Gleichzeitigkeit häuft sich die Bewegung in dem Gefässe an, verbreitet sich von da durch das Zimmer und bringt diese gewaltige Anschwellung des Tones hervor.

Fig. 93.



Ersetzen wir die Luft in einem dieser Gefässe durch ein Gas von anderer Elasticität, so ist auch die Länge

der resonirenden Säule eine andere. Die Schallgeschwindigkeit in Leuchtgas verhält sich zu der Schallgeschwindigkeit in der Luft ungefähr wie 8 zu 5. Um also im gleichen Rhythmus wie unsere Gabel zu schwingen, müsste ein Gefäss mit Leuchtgas tiefer sein, als ein Gefäss mit Luft. Ich drehe nun dieses 45 cm tiefe Gefäss um und halte die angeschlagene Stimmgabel dicht an seine Oeffnung; sie tönt kaum hörbar. Mit Luft gefüllt, ist dieses Gefäss 12,5 cm zu tief für die Gabel. Nun lasse ich Leuchtgas in das Gefäss einströmen. Während das Gas im Gefässe aufsteigt schwillt der Ton und beweist, dass für das elastischere Gas eine Tiefe von 45 cm nicht zu gross ist. In der That ist sie nicht einmal gross genug, denn wenn ich zu viel Gas hineinlasse, wird die Resonanz wieder schwächer. Kehrt man das Gefäss plötzlich um, ohne die Gabel von der Oeffnung zu entfernen, so entweicht das Gas und sobald die richtige Mischung von Gas und Luft zu Stande gekommen ist, schwillt der Ton von Neuem an[1]). Nach diesem Princip hat George Forbes ein sehr sinnreiches kleines Instrument erfunden, um schlagende Wetter nachzuweisen. Aus der Länge der Luftsäule, die auf eine Stimmgabel von gegebener Höhe resonirt, schliesst er auf den Procentsatz von Sumpfgas in der Luft des Bergwerks.

§. 9. Verstärkung einer Glocke durch Resonanz.

Ich habe hier eine schöne, volltönende Glocke (Fig. 94), die ich in starke Schwingungen versetze, indem

[1]) Dieser Versuch lässt sich leichter mit Wasserstoff ausführen als mit Leuchtgas.

ich mit einem geharzten Bogen an ihrem Rande entlang streiche. Ihr Ton ist rein, aber nicht sehr stark. Wird dagegen die Oeffnung einer weiten Röhre, die an einem Ende geschlossen ist, einer der schwingenden Abtheilungen der Glocke genähert, so schwillt der Ton mächtig an, bleibt jedoch dabei weich und musikalisch. Wird diese Röhre abwechselnd entfernt und genähert, so steigt und fällt die Tonstärke in auffallender Weise.

Fig. 94.

Ich nehme nun eine zweite Röhre, die an beiden Enden offen ist und mittelst einer Auszugsröhre verlängert oder verkürzt werden kann. Bringe ich sie an die schwingende Glocke, so ist die Resonanz schwach. Wenn ich aber die Röhre verlängere, indem ich das eingeschobene Stück herausziehe, so schwillt der Ton bei einem gewissen Punkte an, wie zuvor. Ziehe ich die Röhre noch weiter aus, so wird die Resonanz wieder schwächer. Ich möchte darauf aufmerksam machen, dass die offene Röhre, welche die stärkste Resonanz giebt, gerade zweimal so lang ist, als die geschlossene, eine Thatsache, die ich gleich erklären will. Diese schönen Versuche verdanken wir Savart.

§. 10. Verbrauch von Bewegung bei der Resonanz.

Bei dem Gummischlauch, den wir in der dritten Vorlesung benutzten, mussten wir die Stösse tactmässig erfolgen lassen, um die verschiedenen Knotensysteme zu erzeugen. Hierbei konnte ich fühlen, dass meine Muskeln mehr Arbeit leisten mussten, wenn meine Bewegungen tactmässig erfolgten, als wenn sie unregelmässig waren. Dieselbe Thatsache beobachtet man, wenn man ein Weinglas halb mit Wasser füllt und nun versucht, es mit der Hand genau in demselben Tacte hin und her zu bewegen, in welchem das Wasser Wellen schlägt. Wenn Sie Ihre Bewegungen ganz in Uebereinstimmung mit denen des Wassers gebracht haben, erregt Ihnen die Anstrengung in der Hand das Gefühl, als ob das Wasser schwerer geworden wäre. Ebenso ist es mit unserer Stimmgabel. Wenn ihre Bewegungen sich den Schwingungen der Luftsäule im Gefässe anschliessen müssen, leistet sie mehr Arbeit, als wenn sie es nicht thun. Darum kommt die Stimmgabel früher in Ruhe, wenn sie über das Gefäss gehalten wird, als wenn sie in freier Luft oder über einem Gefäss schwingen kann, dessen Tiefe nicht zu ihrer Schwingungsdauer passt [1]).

Mit Hülfe des eben Gelernten würde es Ihnen nicht schwer werden, die folgende schöne Aufgabe zu lösen: Sie haben eine Stimmgabel und eine

---

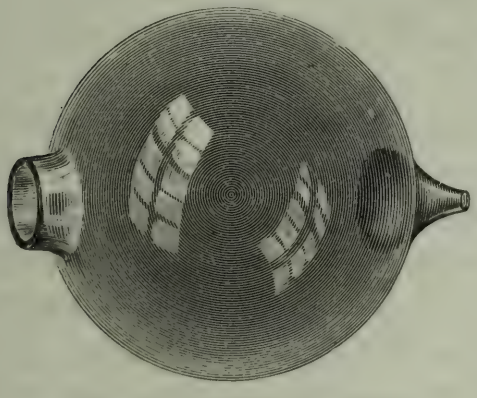
[1]) Nur ein ausserordentlich kleiner Bruchtheil der Bewegung der Gabel wird in Ton verwandelt. Das Uebrige wird verbraucht, um die innerliche Reibung ihrer eigenen Theilchen zu überwinden. Mit anderen Worten: fast die ganze Bewegung wird in Wärme umgesetzt.

Sirene und sollen mit diesen beiden Instrumenten die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft bestimmen. Um diese Aufgabe zu lösen, fehlt Ihnen höchstens die Beherrschung der Handgriffe, die man durch Uebung erlangt. Zuerst hätten Sie mittelst der Sirene die Zahl von Schwingungen zu bestimmen, die Ihre Stimmgabel in der Secunde ausführt; dann hätten Sie die Länge der Luftsäule festzustellen, welche für die Gabel resonirt. Diese Länge multiplicirt mit 4 gäbe Ihnen nahezu die Länge der Tonwelle, und die Wellenlänge multiplicirt mit der Zahl der Schwingungen in der Secunde drückte die verlangte Schnelligkeit aus. Also könnten Sie, ohne das Zimmer zu verlassen, diese wichtige Aufgabe lösen. Wenn Sie gestatten, wollen wir in dieser Weise fortfahren, uns beim Fortschreiten unseren Boden Schritt für Schritt zu sichern.

§. 11. Helmholtz'sche Resonatoren.

Helmholtz benutzte das Princip der Resonanz, um zusammengesetzte Töne zu analysiren. Er verwendete dazu kleine hohle Metallkugeln, Resonatoren genannt, deren eine Fig. 94 a abgebildet ist. Der kleine Vorsprung *b*, welcher mit einer Oeffnung endigt, wird an das Ohr gebracht, während die Tonwellen durch die grosse Oeffnung *a* in die Hohlkugel eindringen. So kann man mittelst der Resonanz dieses Hohlraumes

Fig. 94 a.



einen einzelnen Ton des zusammengesetzten Klanges verstärken, gewissermaassen isoliren und allein studiren.

Orgelpfeifen.

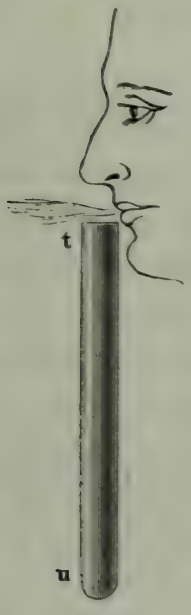
§. 12. Gesetze der Resonanz auf Orgelpfeifen angewendet.

Wir sind nun hinreichend vorbereitet, um uns einem sehr wichtigen Gegenstande, der Betrachtung von Orgelpfeifen, zuwenden zu können. Auf dem Tische vor mir stehen zwei resonirende Gefässe, und in jeder Hand halte ich eine Stimmgabel. Ich setze beide Gabeln in Schwingung und halte sie beide über das eine Gefäss. Nur eine der Gabeln tönt hörbar. Ich halte beide über das andere Gefäss und jetzt tönt nur die andere Gabel. Jedes Gefäss wählt diejenige Gabel, deren Schwingungsperioden mit den seinigen übereinstimmen. Statt zwei Gabeln könnte ich zwei Dutzend über jedes dieser Gefässe halten, und aus der wirren Menge der davon herrührenden Wellen würde das Gefäss nur die eine aussuchen und verstärken, die seinen eigenen Schwingungsperioden entspricht.

Blase ich quer über die Oeffnung des Gefässes, oder noch besser, über das Ende einer Glasröhre *tu* (Fig. 95), welche dieselbe Länge als das Gefäss hat, so bringe ich eine schwirrende Bewegung der Luft hervor; ich errege in der That eine Anzahl von unregelmässigen Luftstössen an der offenen Mündung der Röhre. Was ist die Folge davon? Die Röhre wählt aus dem Geschwirr die Erschütterungen aus, mit denen sie selbst in Einklang ist, und erhebt sie zu der Würde eines musika-

lischen Tones. Der Ton ist genau derselbe, den wir erhalten, wenn wir die passende Stimmgabel über die Röhre bringen. Die Luftsäule in der Röhre hat sich in diesem Falle wirklich ihre eigene Stimmgabel geschaffen; denn durch die Rückwirkung ihrer Wellen auf die dünne Schicht bewegter Luft, die von meinen Lippen kam, hat sie diese Schicht gezwungen, mit ihr im Einklange zu schwingen und somit die Rolle der Stimmgabel zu spielen.

Fig. 95.



Wählt man für jede der anderen Stimmgabeln eine resonirende Röhre, so entsteht jedesmal, wenn man quer über die offene Mündung der Röhre bläst, ein Ton, der dieselbe Höhe hat wie der durch Resonanz erzeugte.

Wenn verschiedene Röhren verglichen werden, so steht die Schwingungszahl in umgekehrtem Verhältniss zur Länge der Röhren. Ich habe hier drei Röhren, die 15, 30 und 60 cm lang sind. Ich blase schwach über die 60 cm lange Röhre und bringe ihren Grundton hervor; ich blase ebenso über die 30 cm lange Röhre und finde, dass ihr Ton die Octave der 60 cm langen Röhre ist. Ich blase über die 15 cm lange Röhre und erhalte einen Ton, der die Octave der 30 cm langen Röhre ist. Es ist klar, dass dies der Fall sein muss, denn da die Schwingungszahl von der Entfernung abhängt, die die Welle zu durchlaufen hat, um eine ganze Schwingung zu vollenden, so muss, wenn in einem Falle die Entfernung doppelt so gross ist, als in einem anderen, die Schwingungszahl nur halb so gross sein. Allgemein ausgedrückt, steht die

Schwingungszahl in umgekehrtem Verhältniss zu der Länge der Röhre, welche die Welle durchläuft.

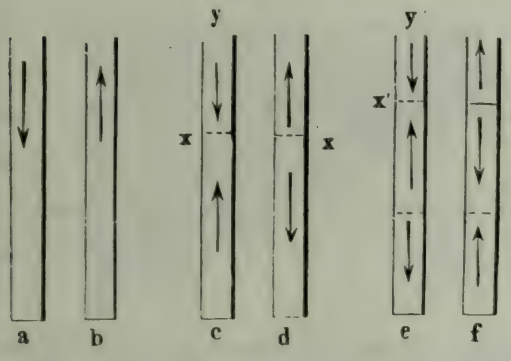
§. 13. Schwingungen gedackter Röhren. — Verschiedene Arten der Abtheilung. — Obertöne.

Um sich den Forderungen der Röhre auf diese Weise anpassen zu können, muss der Luftstrom einen gewissen Grad von *Schmiegsamkeit* haben. Etwas Ueberlegung wird Ihnen sagen, dass der Einfluss, welchen die zurückgeworfene Welle auf den Strom ausübt, bis zu einem gewissen Grade von der Kraft des Stromes abhängen muss. Ein stärkerer Strom erfordert, ebenso wie eine stärker gespannte Saite, grössere Kraft, um abgelenkt zu werden, und schwingt schneller, wenn er abgelenkt ist. Demnach muss ich sehr schwach über das obere Ende dieser Röhre hinwegblasen, wenn ich ihren Grundton erhalten will. Geschieht dies, so kommt ein reicher, voller und kräftiger musikalischer Ton heraus. Wenn ich etwas stärker blase, so wird der Ton mehr einem Geräusch ähnlich. Blase ich noch stärker, so erhalte ich einen viel höheren Ton als den Grundton. Dies ist der erste Oberton der Röhre, zu dessen Erzeugung sich die Luftsäule darin in zwei schwingende Theile scheiden musste, die durch einen Knoten getrennt sind. Ich blase noch stärker und erhalte einen noch höheren Ton; die Röhre ist nun in drei schwingende Theile geschieden, die durch zwei Knoten von einander getrennt sind. Ich blase noch einmal mit möglichster Kraft und es folgt ein Ton, der höher ist, als alle bisher erreichten.

In Fig. 96 sind die Abtheilungen der Luftsäule abgebildet, wie sie den drei ersten Tönen einer Röhre

entsprechen, die an einem Ende geschlossen ist. Bei *a* und *b*, welche dem Grundton entsprechen, ist die Säule ungetheilt, der Boden der Röhre ist der einzige Knoten, und die Welle läuft einfach von der Oeffnung zum Boden auf und ab, wie die Pfeile es andeuten. Bei *c* und *d*, welche dem ersten Oberton der Röhre entsprechen, haben wir eine Knotenfläche durch Punkte angezeigt, gegen welche die Wellen anlaufen und von der sie, wie von einer festen Wand, zurückgeworfen werden. Diese Knotenfläche liegt auf einem Drittel der Länge der Röhre, vom offenen Ende ab gerechnet. Bei *e* und *f*, welche dem zweiten Oberton entsprechen, haben wir zwei Knotenflächen, deren obere an einem Fünftel der Röhrenlänge vom offenen Ende liegt, während die übrigen vier Fünftel durch die zweite Knotenfläche in zwei gleiche Theile getheilt werden. Die Pfeile zeigen auch hier die Richtung der Bewegung an.

Fig. 96.



Wir haben nun nach der Beziehung zu fragen, in welcher diese Töne zu einander stehen. Die Entfernung zwischen zwei Knoten haben wir bisher stets einen Schwingungsbauch genannt; also ist die Entfernung von der Mitte einer schwingenden Abtheilung bis zu einem Knoten ein halber Schwingungsbauch. Sie werden leicht das Gesetz behalten, dass die Zahl der Schwingungen in geradem Verhältniss steht zu der Zahl der halben Bäuche, in welche die Luftsäule der Röhre eingetheilt ist. Wenn der Grundton

gegeben wird, haben wir also nur einen halben Schwingungsbauch. Der Boden bildet einen Knoten, und das offene Ende der Röhre, wo die Luft erschüttert wird, die Mitte einer schwingenden Abtheilung. Die Theilungsart, die in *c* und *d* abgebildet ist, ergiebt drei halbe Schwingungsbäuche; bei *e* und *f* sind ihrer fünf. Die Schwingungen, die dieser Reihe von Tönen entsprechen, steigen daher in dem Verhältniss der ungeraden Zahlen 1 : 3 : 5. Und könnten wir noch höhere Töne hervorbringen, so würden ihre Schwingungszahlen auch weiter durch die Zahlen 7, 9, 11, 13 ausgedrückt werden.

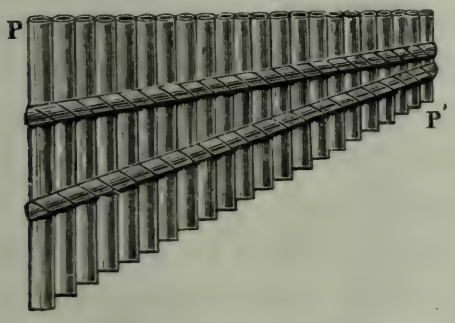
Es liegt auf der Hand, dass sich die Zahlen in dieser Ordnung folgen müssen. Denn die Schwingungsdauer in *c* oder *d* ist gleich der Länge in einer geschlossenen Röhre von der Länge *xy*; diese Länge aber beträgt nur ein Drittel der ganzen Röhre, folglich müssen die Schwingungen darin dreimal so schnell sein, als in der ganzen Röhre. Bei *e* und *f* ist die Schwingungsdauer gleich der in einer geschlossenen Röhre von der Länge *x'y'*, und da diese ein Fünftel der ganzen Röhrenlänge ausmacht, müssen die Schwingungen fünfmal so schnell sein. So erhalten wir die Folge 1, 3, 5, und würden, wenn wir die Sache noch weiter ausführen wollten, die Fortsetzung dieser ungeraden Zahlen bekommen.

Hier liegt es nun wieder in Ihrer Macht, meine Behauptungen durch den Versuch zu prüfen. Ich habe zwei Röhren, von denen die eine dreimal so lang ist als die andere. Zuerst gebe ich den Grundton der längsten Röhre und dann den nächsten Ton über dem Grundton an. Die Schwingungen dieser beiden Töne sollen sich nach meiner Aussage wie 1 zu 3 verhalten. Dieser letztere Ton müsste demnach genau dieselbe Höhe

haben, wie der Grundton der kürzeren der beiden Röhren.

Man braucht nur eine Reihe solcher Röhren von verschiedener Länge mit einander zu verbinden, um jenes antike, uns allen wohlbekannte Instrument, die Pansflöte PP' (Fig. 97), zu bilden.

Fig. 97.



Bei einem Stabe, der an einem Ende befestigt ist (S. 192), sind also die verschiedenen Abtheilungen und das Verhältniss der Obertöne dieselben, wie bei der Luftsäule einer an einem Ende geschlossenen Röhre.

§. 14. Schwingungen offener Röhren. — Verschiedene Arten der Abtheilung. — Obertöne.

Von Röhren, die an einem Ende geschlossen sind, und der Kürze halber gedackte Röhren heissen mögen, gehen wir nun zu solchen Röhren über, die an beiden Enden offen sind, die wir daher offene Röhren nennen wollen. Wenn wir zuerst eine gedackte Röhre mit einer offenen von derselben Länge vergleichen, so finden wir den Ton der offenen eine Octave höher, als den der gedackten. Dies trifft in allen Fällen zu. Damit eine offene Röhre denselben Ton gebe wie eine gedackte, muss sie doppelt so lang sein. Da nun die Länge einer geschlossenen Röhre, die ihren Grundton giebt, ein Viertel von der Länge ihrer Tonwelle beträgt, so muss die

Länge einer offenen Röhre die Hälfte der Tonwelle betragen, welche von ihr erregt wird.

Es ist nicht leicht, einen anhaltenden musikalischen Ton zu erzeugen, indem man über das Ende einer dieser offenen Glasröhren hinweg bläst; aber schon wenn ein kurzer Luftstoss über das Ende hingeht, erkennt ein geübtes Ohr die Tonhöhe. Diese ist immer gleich der einer gedackten Röhre, die halb so lang ist als die offene. Es giebt verschiedene Methoden, die Luft an den Enden der Pfeifen und Röhren so in Bewegung zu setzen, dass die Luftsäulen in ihrem Inneren in Schwingung gerathen. Bei Orgelpfeifen geschieht es dadurch, dass eine schmale Luftschicht gegen eine scharfe Kante geblasen wird. Es wird Ihnen nicht schwer werden, die Construction dieser offenen Orgelpfeife (Fig. 98) zu verstehen, die im Durchschnitt gegeben ist, damit Sie die innere Einrichtung sehen können. Die Luft geht durch die untere Röhre von der Windlade in die Kammer *K*; diese ist oben geschlossen, hat aber eine schmale Ritze *cd*, durch welche die zusammengepresste Luft der Kammer entweicht. Dieser dünne Luftstrom brandet gegen die scharfe Kante *ab* und bringt hier ein schwirrendes Geräusch hervor, aus welchem gewisse Impulse durch die Resonanz der Pfeife verstärkt und in einen Ton verwandelt werden. Der offene Raum zwischen der Kante *ab* und der Ritze darunter wird die Mundöffnung genannt. Fig. 99 zeigt eine gedackte Pfeife von derselben Länge wie Fig. 98, die daher einen eine Octave tieferen Ton giebt.

Statt die Luft durch Anblasen zu erschüttern, kann ich auch eine Stimmgabel, deren Schwingungsdauer mit der der Pfeife übereinstimmt, vor die Mundöffnung halten

Fig. 98.

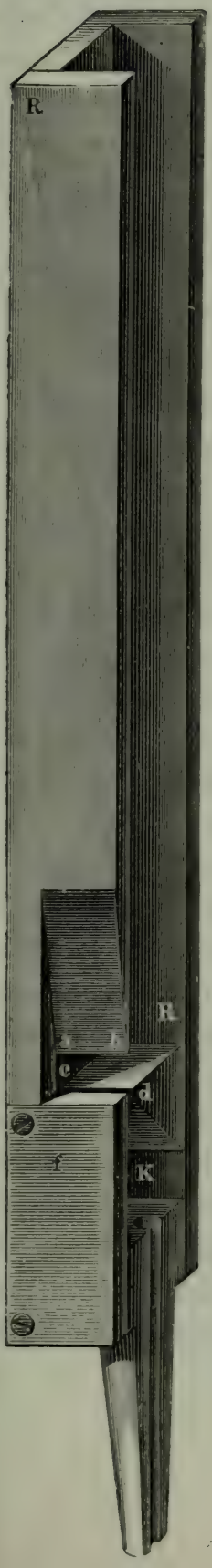
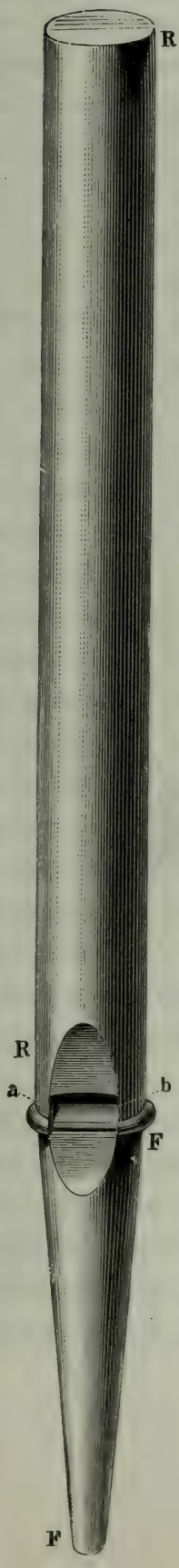


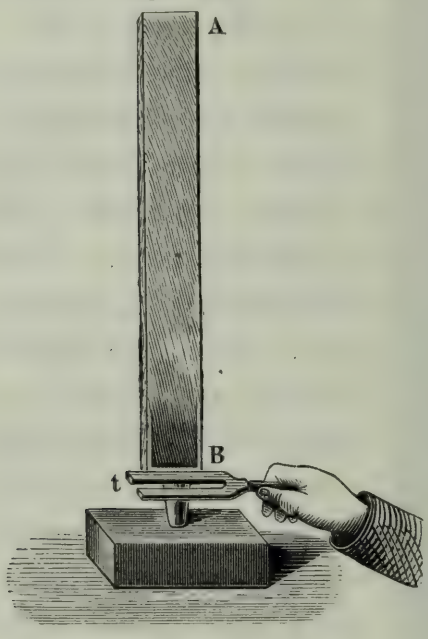
Fig. 99.



(siehe Fig. 100 *AB*, a. f. S.). Die Pfeife resonirt. Hier sind z. B. vier offene Pfeifen von verschiedener Länge und vier Stimmgabeln von verschiedenen Schwingungsperioden. Mit der längsten Pfeife beginnend, schlage ich die Stimmgabel, die am langsamsten schwingt, an, und halte sie vor die Mundöffnung. Die Pfeife spricht mächtig an. Wird die zweite Pfeife angeblasen, so ergiebt sie denselben Ton, wie der von der Stimmgabel erregte. Ich nehme alle Pfeifen der Reihe nach durch und finde jedesmal, dass der Ton, welchen die Pfeife giebt, wenn hinein geblasen wird, genau derselbe ist, den die passende Stimmgabel giebt, wenn man sie vor die Mundöffnung hält. Denken Sie sich alle

vier Stimmgabeln vor dieselbe Mundöffnung gehalten, so würden wir Wellen von vier verschiedenen Schwingungsperioden dort erregen; die Pfeife jedoch würde von den vieren nur eine auswählen. Und wenn 400 schwingende Gabeln an die Mundöffnung gehalten werden könnten, würde die Pfeife dennoch die richtige Wahl treffen. Dies thut sie auch dann, wenn wir die Anstösse durch die Stimmgabeln durch das Gewirre von Stössen ersetzen, die der gegen die scharfe obere Kante der Mundöffnung brandende Luftstrom hervorbringt.

Fig. 100.



Die schwere schwingende Masse der Stimmgabel wird nicht thatsächlich von der Bewegung der Luft in der Pfeife beeinflusst. Anders jedoch ist es, wenn Luft selbst der schwingende Körper ist. In diesem Falle schafft sich, wie bereits erklärt, die Pfeife ihre eigene Stimmgabel, indem sie den unregelmässig zitternden Luftstrom an der Mundöffnung zwingt, in Uebereinstimmung mit ihren eigenen Schwingungen zu vibriren.

Der Zustand der Luft innerhalb einer offenen Orgelpfeife, deren Grundton angegeben wird, ist ganz derselbe, wie der eines Stabes, der an beiden Enden frei, dagegen in seiner Mitte festgehalten ist und Längsschwingungen ausführt. Die beiden Enden sind Stellen stärkster Schwingung, die Mitte ist ein Knoten. Giebt es irgend ein Mittel,

um *herauszufühlen*, wo in der schwingenden Säule die Knoten und die Schwingungsbäuche liegen? William Hopkins verdanken wir die Lösung dieser Frage. Dieser kleine Reifen ist wie ein Tambourin mit einem dünnen Häutchen überspannt. Diese Orgelpfeife *ab* (Fig. 101) ist aus Glas, so dass jeder darin befindliche Körper gesehen werden kann. Mittelst eines Fadens kann das kleine Tambourin *m* nach Belieben durch die ganze Länge der Pfeife auf- und abgezogen werden. Hält man es über das obere Ende der Röhre, so hören Sie augenblicklich das laute Schwirren des Häutchens. Lässt man es tiefer in die Röhre hinab, so schwirrt es wohl noch eine Weile fort, aber der Ton wird schwächer und hört schliesslich ganz auf. Jetzt befindet es sich in der Mitte der Röhre, wo es nicht schwingen kann. Lässt man es noch weiter hinab, so beginnt der schwirrende Ton augenblicklich wieder und hält an bis zum Boden der Pfeife. Wenn man also das Häutchen schnell hinter einander auf und ab bewegt, entstehen bei jedem Auf- und Absteigen zwei Perioden des Tönens, die durch eine Periode des Schweigens getrennt sind. Wenn man das Häutchen mit Sand bestreute, so würde derselbe oben und unten in der Pfeife darauf tanzen, in der Mitte aber ruhig bleiben. Dieser Versuch beweist, dass eine Orgelpfeife, die ihren Grundton giebt, in zwei halbe, durch einen Knoten getrennte Schwingungsbäuche zerfällt.

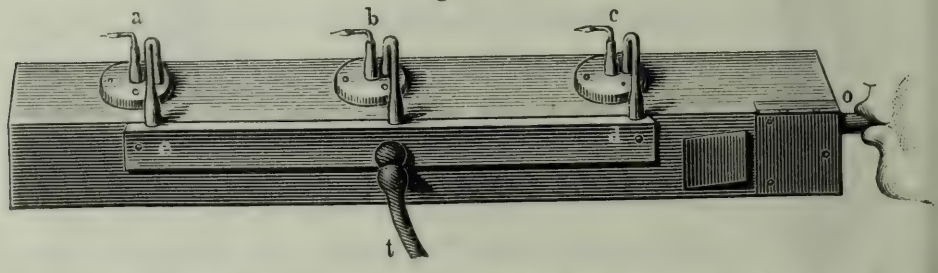
Fig. 101.

Die Luft am Knoten befindet sich wieder genau in dem Zustande eines Stabes, der an beiden Enden

frei ist und den Grundton seiner Längsschwingungen giebt. Die Impulse, welche von beiden Enden des Stabes oder der Luftsäule zurückgeworfen werden, begegnen sich in der Mitte und bewirken hier Verdichtung; dann kehren sie um und bewirken Verdünnung. Während also in der Mitte keine Schwingung stattfindet, erleidet hier die Luft den grössten Wechsel der Dichtigkeit. An den beiden Enden dagegen schwingen die Lufttheilchen nur auf und ab, ohne dass merkliche Verdichtung oder Verdünnung eintritt.

Wenn die tönende Pfeife in der Mitte ein Loch hätte, das mit einem Häutchen geschlossen wäre, so würde die Luft bei ihrer Verdichtung dieses Häutchen heraustreiben, bei ihrer Verdünnung würde es von der äusseren Luft hineingedrückt werden. Also würde das Häutchen in Uebereinstimmung mit der Luftsäule vibriren. Die Orgelpfeife (Fig. 102) ist so eingerichtet,

Fig. 102.



dass eine kleine Gasflamme *b* vor der Mitte der Pfeife angezündet werden kann, so dass sie von den Schwingungen eines Häutchens, wie ich es eben beschrieben habe, beeinflusst wird. Zwei andere Gasflammen *a* und *c* sind in der Mitte und zwischen den zwei Enden der Pfeife angebracht. Diese drei Flammen *abc* werden folgendermassen gespeist: das Gas strömt durch die Röhre *t* in die leere Kammer *ed*, von welcher drei kleine gebogene Röhren in eine Zelle führen, deren

Boden das Häutchen bildet, das mit der Luft der Orgelpfeife direct in Berührung steht. Von diesen drei Zellen gehen die drei kleinen Flammen *abc* aus.

Ich zünde sie alle an und blase darauf in die Pfeife, so dass diese ihren Grundton giebt. Alle drei Flammen werden bewegt, aber die mittlere am meisten. Ich mache nun die Flammen ganz klein. Wenn ich jetzt in die Pfeife blase, so wird die mittelste Flamme verlöschen, während die anderen fortbrennen. Dieser Versuch kann ein halbes Dutzend Mal hinter einander wiederholt werden und jedesmal, wenn ich den Grundton angebe, erlischt die Flamme.

Blase ich stärker in die Pfeife, so giebt sie den ersten Oberton. Der Knoten in der Mitte besteht nicht mehr, in der Mitte der Pfeife finden keine Druckveränderungen statt; dafür bilden sich zwei Knoten in gleicher Entfernung von der Mitte und den beiden Enden. Ist dies nun wirklich der Fall, und wird die Flamme an einem Knoten immer ausgeblasen, so müssen, wenn ich den ersten Oberton der Pfeife angebe, die beiden Flammen *a* und *c* verlöschen, während die mittlere Flamme fortbrennt. Dies geschieht in der That. Wenn ich den ersten Oberton angebe, werden die zwei Flammen an den Knoten stets ausgelöscht, während die Flamme *b* in der Mitte des Schwingungsbauches ohne merkliche Störung weiter brennt.

Theoretisch genommen könnte die Zahl der Knoten in einer gedackten oder offenen Orgelpfeife beliebig gross sein. Bei gedackten Pfeifen fangen wir mit einem halben Schwingungsbauch an, gehen weiter zu 3, 5, 7 u. s. w. halben Schwingungsbäuchen; und die Schwingungszahlen der Töne nehmen in demselben Verhältniss zu. Bei offenen Pfeifen fangen wir mit zwei

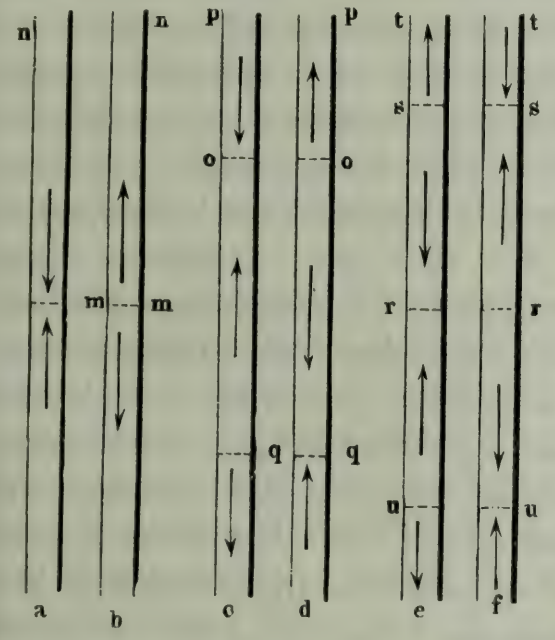
halben Schwingungsbäuchen an und gehen weiter zu 4, 6, 8, 10 u. s. w.; und die Schwingungszahlen der Töne wachsen wieder in demselben Verhältniss; das ist in diesem Falle also wie 1 : 2 : 3 : 4 : 5 u. s. w. Wenn wir daher in einer offenen Pfeife von dem Grundton zu dem ersten Oberton übergehen, so erhalten wir die Octave des Grundtones. Wenn wir denselben Uebergang in einer gedackten Pfeife machen, so erhalten wir einen Ton, der eine Quinte höher ist, als die Octave. In keinem dieser Fälle ist es möglich, einen dazwischen liegenden Ton zu erhalten. Wenn der Grundton einer gedackten Pfeife durch 100 Schwingungen in der Secunde hervorgebracht wird, so wird der erste Oberton durch 300 Schwingungen erzeugt, der zweite durch 500 u. s. f. Eine solche Pfeife kann z. B. nicht 200 oder 400 Schwingungen in der Secunde ausführen. Ebensowenig kann eine offene Pfeife, deren Grundton durch 100 Schwingungen in der Secunde hervorgebracht wird, 150 mal in der Secunde vibriren, sondern geht mit einem Sprunge zu 200, 300, 400 Schwingungen über.

Sowohl in offenen als in gedackten Pfeifen steht die Schwingungszahl, die in einer Zeiteinheit ausgeführt wird, im umgekehrten Verhältniss zur Länge der Pfeife. Dies folgt wieder aus der Thatsache, die wir schon so oft berührt haben, dass die Dauer einer Schwingung von der Entfernung bestimmt wird, welche die Tonwelle durchlaufen muss, um eine vollständige Schwingung auszuführen.

In Fig. 103 bezeichnen *a* und *b* die Abtheilung einer offenen Pfeife, wie sie ihrem Grundton entspricht; *c* und *d* die Abtheilung bei dem ersten, *e* und *f* die Abtheilung bei dem zweiten Oberton. Die Punkte bezeichnen

die Knoten. Die Entfernung *mn* ist die Hälfte, *op* ein Viertel, *st* ein Sechstel der ganzen Länge der Pfeife. Aber der Ton von *a* ist gleich der einer gedackten Pfeife von derselben Länge wie *mn*; der Ton von *c* gleich dem einer gedackten Pfeife von der Länge *op*, und der Ton von *e* gleich dem einer gedackten Pfeife von der Länge *st*. Da nun diese Längen in dem Verhältniss von $1/2 : 1/4 : 1/6$ oder von $1 : 1/2 : 1/3$ stehen,

Fig. 103.



müssen die Schwingungszahlen im umgekehrten Verhältniss stehen, das heisst sie müssen sich wie 1 : 2 : 3 verhalten. Wir können also aus dem blossen Anblick der betreffenden Schwingungsweisen schon den Schluss ziehen, dass die Reihenfolge der Töne in einer offenen Pfeife der Reihe der ganzen Zahlen entsprechen muss.

Ich habe absichtlich die Pfeife *a* (Fig. 103) zweimal so lang gezeichnet als *a*, Fig. 96. Es ist ganz klar, dass die Welle in beiden Pfeifen dieselbe Entfernung zu durchlaufen hat, ehe eine Schwingung vollendet ist, und dass daher die Tonhöhe dieser beiden Pfeifen gleich sein muss. Die offene Pfeife *an* besteht eigentlich aus zwei geschlossenen, die bei dem Knotenpunkte *m* ihre gemeinschaftliche Bodenfläche haben. Also beweist uns der blosse Anblick der betreffenden Schwingungsarten,

dass das Verhältniss einer gedackten Pfeife zu einer offenen so ist, wie der Versuch es hinstellt.

§. 15. Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern durch musikalische Schwingungen.

Wir wissen bereits, dass die relative Schallgeschwindigkeit in verschiedenen festen Körpern bestimmt werden kann nach den Tönen, die sie geben, wenn sie in Längsschwingungen versetzt werden, und sahen damals, dass wir, um eine Tabelle absoluter Geschwindigkeiten aufstellen zu können, nur die Geschwindigkeit in diesen Körpern mit der Geschwindigkeit in der Luft genau zu vergleichen haben. Wir sind nun im Stande, diesen Vergleich auszuführen. Denn wir wissen, dass die Luftschwingungen in einer an beiden Enden offenen Orgelpfeife genau so vor sich gehen, wie in einem Stabe, der an beiden Enden frei ist. Also muss jede Verschiedenheit der Geschwindigkeit zwischen den Schwingungen eines Stabes und denen einer offenen Orgelpfeife gleicher Länge allein von der verschiedenen Geschwindigkeit herrühren, mit der sich die Tonwelle durch beide fortpflanzt. Man nehme daher eine Orgelpfeife von bestimmter Länge, die einen Ton von bestimmter Höhe giebt und erprobe, wie lang ein Stab aus Fichtenholz sein muss, um denselben Ton zu geben. Der Stab wird zehnmal so lang sein müssen als die Orgelpfeife; also ist die Schallgeschwindigkeit in Fichtenholz zehnmal so gross als in der Luft. Die absolute Geschwindigkeit in der Luft bei 0^0 ist aber 332,7 m in der Secunde; folglich ist die absolute Geschwindigkeit in Fichtenholz 3327 m in der Secunde. Dem trefflichen Chladni verdanken wir diese

Methode, die Schallgeschwindigkeit in festen Körpern zu bestimmen.

In unserer ersten Vorlesung gab ich Ihnen eine Tabelle der Schallgeschwindigkeit in anderen Gasen als der Luft. Ich bin überzeugt, dass Sie mir nach einiger Ueberlegung sagen könnten, wie diese Tabelle aufgestellt worden ist. Man hat nur eine Reihe von Orgelpfeifen zu suchen, die, mit verschiedenen Gasen gefüllt, denselben Ton geben; die Länge dieser Pfeifen ergiebt die relative Schallgeschwindigkeit in den Gasen. Auf diese Weise zeigt sich, dass eine Pfeife mit Wasserstoff viermal so lang sein muss, als eine mit Sauerstoff, um denselben Ton zu geben; daraus folgt, dass die Geschwindigkeit in Wasserstoff viermal so gross ist als die in Sauerstoff.

Wir hatten aber auch eine Tabelle der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Flüssigkeiten. Wie wurde diese aufgestellt? Indem man die Flüssigkeiten durch dazu eingerichtete Orgelpfeifen trieb und dann ihre musikalischen Töne verglich. So würde man bei Wasser eine etwas über 1,20 cm lange Pfeife brauchen, um denselben Ton zu erhalten, den eine 30 cm lange Pfeife in der Luft giebt; ein Beweis, dass die Tongeschwindigkeit in Wasser etwas mehr als viermal so gross ist, als die in der Luft. Mein Zweck ist hier nur, Ihnen eine klare Anschauung davon zu geben, in welcher Weise wir durch wissenschaftliche Erfahrungen befähigt werden, anscheinend unüberwindliche Aufgaben zu lösen. Ich gehe daher nicht weiter in die Feinheiten dieser Messungen ein. Aber Sie werden leicht begreifen, dass sämmtliche Versuche mit Gasen an ein und derselben Orgelpfeife ausgeführt werden könnten, und dass sich die Schallgeschwindigkeit jedes Gases augenblicklich

aus der Höhe des Tones ergeben würde. Bei einer Pfeife von constanter Länge stände die Höhe oder, in anderen Worten, die Schwingungszahl in geradem Verhältniss zu der Schallgeschwindigkeit. So würden wir bei der Vergleichung von Sauerstoff mit Wasserstoff den Ton des Wasserstoffs zwei Octaven höher finden, als den des Sauerstoffs und daraus entnehmen, dass die Schallgeschwindigkeit in Wasserstoff viermal so gross sei, als in Sauerstoff. Dasselbe gilt für Versuche mit Flüssigkeiten. Auch dabei braucht man stets dieselbe Pfeife und schliesst die Schallgeschwindigkeit aus den Tönen, welche die verschiedenen Flüssigkeiten geben.

Da die Länge einer offenen Pfeife, wie schon erwähnt, die Hälfte ihrer Tonwelle beträgt, braucht man in der That nur mittelst der Sirene die Schwingungszahl zu bestimmen, welche die Pfeife in der Secunde ausführt, und diese Zahl mit zweimal der Länge der Pfeife zu multipliciren, um die Schallgeschwindigkeit in dem Gase oder der Flüssigkeit innerhalb der Pfeife zu erhalten. Eine 68 cm lange Pfeife mit Luft führt 256 Schwingungen in der Secunde aus. Die Länge ihrer Tonwelle beträgt 1,36 m. Multipliciren wir 256 mit 1,36, so erhalten wir 348 m in der Secunde als die Schallgeschwindigkeit in Luft von der Temperatur dieses Zimmers. Bei Kohlensäure würden die Schwingungen langsamer sein; bei Wasserstoff schneller, und indem wir nach denselben Grundsätzen verführen, könnten wir die Schallgeschwindigkeit in beiden Gasen finden.

Ein massiver Stab, der an beiden Enden frei ist und seinen Grundton giebt, ist ebenfalls halb so lang, als die Tonwelle in der Substanz, aus der der Stab besteht. Demnach brauchen wir nur die Schwingungszahl eines solchen Stabes zu bestimmen, und sie mit zweimal

der Länge des Stabes zu multipliciren, dann haben wir die Schallgeschwindigkeit in der Substanz des Stabes. Sie werden ohne Zweifel mit Ueberraschung wahrnehmen, welche Macht uns die Naturwissenschaft solchen Aufgaben gegenüber verliehen hat, und Sie werden auch jenem berühmten alten Forscher, Chladni, Ihre Bewunderung nicht versagen, der uns lehrte, sie durch den Versuch zu überwinden.

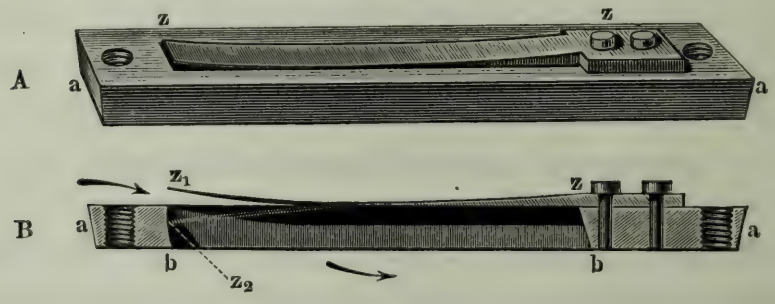
Zungen und Zungenpfeifen.

Die Construction der Sirene und unsere Versuche mit diesem Instrument sind Ihnen gewiss noch frisch im Gedächtniss. Die musikalischen Töne wurden dadurch erzeugt, dass ein Luftstrom in eine Reihe einzelner Stösse zerschnitten wurde. Derselbe Zweck wird erreicht durch eine schwingende Zunge, wie wir sie bei der Harmonika, der Concertina und dem Harmonium angewendet finden. Bei diesen Instrumenten sind es nicht die Schwingungen der Zunge selbst, welche, der Luft mitgetheilt und durch sie unserem Gehörorgan zugeführt, die Musik erzeugen. Die Zunge giebt nur die Veranlassung, nicht die Ursache des Tones ab. Sie macht aus dem Luftstrom, der ohne sie nicht unterbrochen worden wäre, eine Reihe getrennter Stösse.

Wenn Zungen mit Orgelpfeifen in Verbindung gebracht werden, so bestimmen sie entweder die Schwingungen der Luftsäule, oder sie werden von denselben bestimmt. Sind sie steif, so bestimmen sie die Säule; sind sie biegsam, so werden sie von der Säule bestimmt. Um im ersteren Falle aus der Verbindung mit der Luft-

säule Vortheil zu ziehen, müsste deren Länge so abgepasst sein, dass entweder ihr Grundton oder einer ihrer Obertöne dem Schwingungstempo der Zunge entspräche. Die Metallzunge, wie man sie gewöhnlich bei Orgelpfeifen anwendet, ist in Fig. 104 *A* perspectivisch, und in *B* im Querschnitt abgebildet. Sie besteht aus einem langen biegsamen Metallstreifen *zz*, der vor einer viereckigen

Fig. 104.



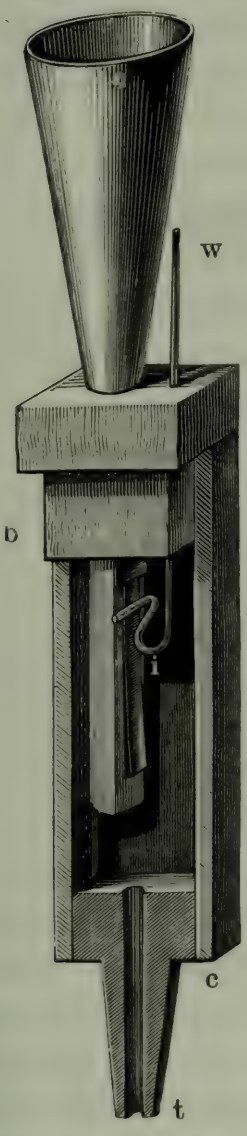
Oeffnung angebracht ist, durch welche die Luft in die Pfeife einströmt. Wie die Zunge und die Pfeife mit einander verbunden sind, zeigt Fig. 105. Daselbst hat der Raum, welcher die biegsame Zunge enthält, eine Vorderwand von Glas; die Figur stellt ihn im Durchschnitt dar. Ein conisches Windrohr steht über der Zunge [1]). Der Draht *wi*, der, wie Sie sehen, auf die Zunge drückt, dient dazu, sie zu verlängern und zu verkürzen und so innerhalb gewisser Grenzen ihre Schwingungsdauer zu verändern.

Es giebt zwei Arten von Zungen, die freie und die ausschlagende. Die freie Zunge schwingt durch die Oeffnung hin und her, ohne die Ränder zu berühren. Diese Art benutzt man bei den mit der Harmonika ver-

[1]) Die Durchschnitte von Orgelpfeifen und Zungen, wie sie hier und im IV. Kapitel vorkommen, sind wesentlich den Tonempfindungen von Helmholtz entnommen. In der Vorlesung wurden Pfeifen benutzt, die sich öffnen lassen, so dass man ihre innere Einrichtung sehen konnte.

wandten Instrumenten. Die ausschlagende Zunge fällt auf die Ränder der Oeffnung auf und schliesst und öffnet sie periodisch. Diese findet bei der Orgel und anderen Instrumenten Anwendung. Bei der Orgel gehorcht die Pfeife der Zunge, bei der Clarinette und Oboe, die biegsame hölzerne Zungen haben, gehorcht die Zunge der Pfeife. Wenn die Schwingungen der Zunge und der mit ihr verbundenen Pfeife in vollkommenem Einklange stehen, so ist der Ton äusserst rein und stark; doch ist eine gewisse Abweichung vom Einklange nach beiden Seiten hin zulässig.

Fig. 105.



Das einfachste Beispiel der Thätigkeit einer Zunge, die ihrer Luftsäule gehorcht, giebt vielleicht ein gewöhnlicher Strohhalm. Ungefähr $2^1/_2$ cm von einem Knoten bei r entfernt, mache ich mit meinem Federmesser einen Einschnitt in diesen Halm sr' (Fig. 106, a. f. S.), etwa ein Viertel so tief als der Durchmesser des Halmes; dann lege ich die Klinge flach und fahre damit gegen den Knoten hinauf, wodurch ich einen Strohstreifen ablöse, der etwa $2^1/_2$ cm lang ist. Dieser Streifen rr' soll unsere Zunge und der Halm selbst unsere Pfeife sein. Er ist jetzt 20 cm lang. Ich blase hinein und Sie hören einen entschieden musikalischen Ton. Schneide ich nun ein Stück davon ab, so dass der Halm nur noch 15 cm lang

ist, so erhalte ich einen höheren Ton. Bei 10 cm Länge ist der Ton noch höher und bei 5 cm Länge wird er sehr scharf und schrill. Bei allen diesen Versuchen benutzten wir dieselbe Zunge, die sich stets den Anforderungen der schwingenden Luftsäule fügen musste.

Die Clarinette ist eine Zungenpfeife. Sie hat eine einzige breite Zunge, mit der eine lange, cylindrische

Fig. 106.

Röhre in Verbindung steht. Das Zungenende des Instrumentes wird zwischen die Lippen genommen, und durch deren Druck die Spalte zwischen der Zunge und ihrem Rahmen so schmal gemacht als nöthig. Die Obertöne einer Clarinette sind anders, als die einer Flöte. Eine Flöte ist eine offene Pfeife, eine Clarinette ist eine gedackte, weil bei ihr das Ende, an welchem die Zunge angebracht ist, dem geschlossenen Ende einer Pfeife entspricht. Die Töne der Flöte folgen der Reihe der ganzen Zahlen 1, 2, 3, 4 u. s. w., oder aber der der geraden Zahlen 2, 4, 6, 8 u. s. w.; während die Töne der Clarinette den ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 u. s. w. folgen. Die dazwischen liegenden Töne werden dadurch erzeugt, dass man die Seitenöffnungen des Instrumentes aufmacht. Wheatstone war der Erste, der diesen Unterschied zwischen Flöte und Clarinette bekannt machte, und seine Resultate stimmen mit den späteren Untersuchungen von Helmholtz überein. Bei der Oboe und dem Fagott haben wir zwei Zungen, die spitzwinklig gegen einander geneigt sind, und zwischen beiden eine Spalte, durch welche die Luft gedrängt wird. Das Windrohr der Oboe ist kegelförmig und hat die

Obertöne einer offenen Pfeife, also andere als die Clarinette. Man kann durch Drücken das weiche Ende eines noch grünen Getreidehalmes so spalten, dass es eine Doppelzunge dieser Art bildet, und ein solcher Halm giebt dann wirklich einen musikalischen Ton. Bei dem Horn, der Trompete und dem Serpent treten die Lippen des Blasenden an die Stelle der Zunge. Diese Instrumente bestehen aus langen, kegelförmigen Röhren, und haben dieselben Obertöne wie eine offene Orgelpfeife. Die älteren Instrumente dieser Art ergaben nur Obertöne, und jeder einzelne dieser Töne hing von der Stärke des Blasens und der Stellung der Lippen ab. Jetzt ist es gebräuchlich, die Lücken zwischen den Obertönen dadurch auszufüllen, dass man Klappen anbringt, mittelst welcher der Musiker die Länge der schwingenden Luftsäule verändern kann.

§. 16. Die Stimme.

Das vollkommenste aller Zungeninstrumente ist das Stimmorgan. Es befindet sich beim Menschen über der Trachea oder Luftröhre, an deren oberem Ende gewisse elastische Bänder angebracht sind, welche die Oeffnung beinahe vollständig schliessen. Wenn die Luft aus der Lunge durch die Spalte getrieben wird, welche diese Stimmbänder trennt, so gerathen sie in Schwingung. Durch wechselnde Spannung verändert sich ihr Schwingungstempo und mit ihm die Tonhöhe. Die Schwingungen der Stimmbänder werden nicht wesentlich beeinflusst von der Resonanz des Mundes, obwohl wir später hören werden, dass die Resonanz, indem sie einen oder den anderen von den Tönen der Stimmbänder verstärkt, grossen Einfluss auf die Klangfarbe der Stimme hat. Der weiche und klare Klang der

Stimme hängt davon ab, dass die Stimmritze während der Schwingung in regelmässigen Zwischenräumen vollkommen geschlossen wird.

Die Stimmbänder können beleuchtet und dann in einem Spiegel gesehen werden, den man in passender Richtung hinten in den Mund steckt. Verschiedene Versuche dieser Art sind durch Signor Garcia ausgeführt worden[1]). Ich versuchte einmal, den Kehlkopf von Czermak auf einen Schirm in diesem Zimmer zu werfen, was aber nur theilweise gelang. Man kann jedoch das Organ direct im Kehlkopfspiegel sehen, wo seine Bewegungen beim Singen, Sprechen und Husten deutlich hervortreten. Fig. 107 zeigt es im Ruhezustande. Die Rauhheit der Stimme bei Erkältungen rührt nach Helmholtz her von Schleimflöckchen, welche in den Spalt der Stimmritze gerathen und die mit dem Kehlkopfspiegel gesehen werden können. Die hohe Fistelstimme, mit der manche Menschen behaftet sind, kann, wie Helmholtz meint, dadurch entstehen, dass die Schleimhautlage, welche gewöhnlich unterhalb der Stimmbänder liegt und sie belastet, auf die Seite gezogen wird. Dadurch werden deren Ränder schärfer und ihr Gewicht geringer, während ihre Elasticität sich gleich bleibt, so dass sie nun in schnellere Schwingungen gerathen. Die Schnelligkeit und Genauigkeit, mit welcher die Stimmbänder sowohl ihre Spannung als ihre Form und die Weite der Spalte zwischen sich ändern können, im Verein mit der auswählenden Resonanz der Mundhöhle machen die menschliche Stimme zu dem vollkommensten aller musikalischen Instrumente.

---

[1]) Ich bin es diesem ausgezeichneten Künstler schuldig, auf die Versuche aufmerksam zu machen, welche er der Royal Society im Mai 1855 mittheilte, und über welche im Phil. Mag. 1855, Tom. X, p. 218 berichtet ist.

Der berühmte vergleichende Anatom Johannes Müller zeigte an Kautschukstreifen die Wirkung der Stimmbänder. Er schloss das offene Ende einer Glasröhre durch zwei solche Streifen, zwischen denen eine Spalte offen blieb. Als Luft durch die Spalte getrieben wurde, geriethen die Bänder in Schwingung und gaben einen musikalischen Ton. Helmholtz empfiehlt die Form, wie sie in Fig. 108 gezeigt ist, wo die Röhre, anstatt rechtwinklig abgeschnitten zu sein, in zwei schräge Schnitte ausgeht, über welche dann die Kautschukbänder gezogen sind. Am leichtesten erhält man Töne aus dergleichen Zungen, wenn man einen dünnen Kautschukstreifen um das Ende einer Glasröhre wickelt und ungefähr $2^1/_2$ cm über die Röhre hinausstehen lässt.

Fig. 107.

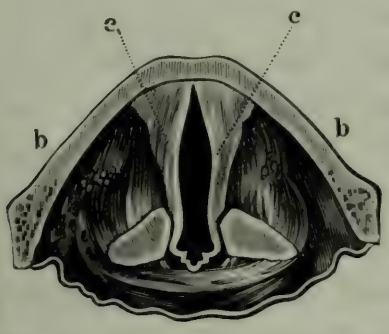
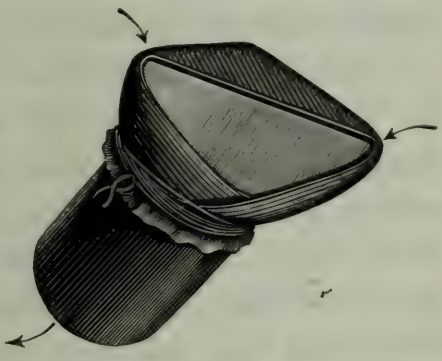


Fig. 108.



Fasst man dann das hervorragende Kautschukende an zwei gegenüberstehenden Punkten und zieht es breit, so bildet sich eine Spalte, und wenn man durch diese bläst, so erhält man einen musikalischen Ton, der seine Höhe verändert, je nachdem die Spannung der Spaltenränder sich ändert.

§. 17. Die Vocale.

Die Bildung der Vocale im menschlichen Stimmorgan war schon seit langer Zeit Gegenstand wissen-

schaftlicher Untersuchung. Wir können einen Vocalklang vom anderen unterscheiden, obgleich beide dieselbe Tonhöhe und Stärke haben. Was für eine Eigenthümlichkeit macht diese Unterscheidung möglich? Im Jahre 1779 wurde diese Preisfrage von der Akademie von Petersburg aufgestellt, und Kratzenstein erhielt den Preis für die gelungene Weise, in welcher er die Vocaltöne durch mechanische Vorrichtungen nachahmte. Gleichzeitig machte von Kempelen aus Wien ähnliche Versuche mit vollkommeneren Apparaten. Dann wurde die Frage von Willis aufgenommen, der in der experimentellen Behandlung des Gegenstandes alle seine Vorgänger übertraf. Die Theorie der Vocaltöne wurde zuerst von Wheatstone festgestellt, und ganz kürzlich hat sie auch Helmholtz zum Gegenstand erschöpfender Untersuchungen gemacht.

Ich stecke diese freie Zunge, die mit keiner Pfeife in Verbindung steht, auf einen Blasebalg, treibe Luft durch die Oeffnung und lasse sie dadurch laut und scharf ansprechen. Nun setze ich auf das Windrohr der Zunge ein passendes kegelförmiges Ansatzrohr. Sie bemerken eine Veränderung in der Klangfarbe, und wenn ich mit der flachen Hand über das offene Ende der Pfeife streiche, so ist die Aehnlichkeit zwischen den dabei erhaltenen Tönen und denen der menschlichen Stimme nicht zu verkennen. Bedecke ich das Ende der Pfeife mit der Handfläche, so dass es ganz geschlossen wird, und hebe dann die Hand zweimal schnell hinter einander, so hört man das Wort „Mama“ so deutlich, als wenn es von einem Kinde gesprochen wäre. Ich nehme nun statt dieses kegelförmigen Ansatzrohres ein kürzeres und mache damit dasselbe Experiment. Das Wort „Mama“ klingt jetzt,

als wäre es von einem Kinde mit zugehaltener Nase gesprochen. So können wir, indem wir mit einer schwingenden Zunge die passende Pfeife in Verbindung bringen, dem Ton der Zunge die Eigenthümlichkeiten der menschlichen Stimme verleihen.

Beim Stimmorgan des Menschen haben wir statt der Stimmbänder die Zunge, und in Verbindung mit dieser Zunge die Resonanzhöhle des Mundes, welche ihre Form so verändern kann, dass sie nach Belieben, sowohl auf den Grundton der Stimmbänder, wie auf jeden ihrer Obertöne resonirt. Mittelst veränderter Stellung des Mundes können wir also den Grundton und die Obertöne der Stimme in verschiedener Stärke zusammenmischen, und verschiedenen Mischungen dieser Art ist die Verschiedenheit der Vocalklänge zuzuschreiben. Ich schlage eine Reihe Stimmgabeln an, halte sie vor den Mund und verändere nun die Form der Mundhöhle, bis sie kräftig resonirt. Dann treibe ich Luft durch die Stimmritze, ohne die Form oder Weite meines Mundes im Geringsten zu verändern. So erhalte ich stets den Vocalton „*U*“. Nun schlage ich eine andere Gabel an, halte sie vor meinen Mund und verändere seine Höhlung, bis sie mittönt. Entferne ich die Gabel und treibe Luft durch den Kehlkopf, so erhalte ich den Vocal „*O*“ und nur diesen. Endlich schlage ich eine dritte Gabel an, passe ihr meine Mundhöhle an und treibe Luft durch den Kehlkopf; man hört den Vocalton „*A*“ und keinen anderen. In all diesen Fällen sind die Stimmbänder durchaus in dem gleichen Zustande geblieben. Sie haben stets denselben Grundton und dieselben Obertöne hervorgebracht, und die Veränderung des Tones, die Sie bemerkten, rührte nur davon her, dass in den verschiedenen Fällen verschiedene Töne von der Resonanz des

Mundes verstärkt wurden. Donders bewies zuerst, dass der Mund für die verschiedenen Vocale verschieden abgestimmt sei.

Beim Hervorbringen der verschiedenen Vocale unterliegt die Mundhöhle nach Helmholtz folgenden Veränderungen:

Um den Vocal „*U*“ hervorzubringen, muss ich die Mundhöhle möglichst weit und ihre Oeffnung möglichst eng machen, indem ich die Lippen nahe an einander bringe. Diese Stellung giebt die tiefste Resonanz, deren der Mund fähig ist. Der Grundton der Stimme wird dadurch verstärkt, während die höheren Töne zurücktreten.

Der Vocal „*O*“ erfordert eine etwas weitere Oeffnung des Mundes. Es treten dabei diejenigen Obertöne stark hervor, welche dem Ton b_1 (mittleres *b* des Soprans) nahe liegen [1]).

Beim „*A*“ geben wir der Mundhöhle eine von hinten nach vorn sich erweiternde trichterförmige Gestalt. Ihre Stimmung ist dabei um eine Octave höher als beim „O“, deshalb sind beim *A* diejenigen Obertöne am meisten verstärkt, welche dem b_2 (hohen *b* des Soprans) nahe liegen. Da der Mund hierbei weit offen ist, hört man übrigens auch alle anderen Obertöne mitklingen, wenn auch schwächer.

Beim „*Ä*“, „*E*“, „*I*“ ist der hintere Theil der Mundhöhle weit, während der vordere Theil der Zunge sich gegen den Gaumen hebt und hier eine Röhre bildet. Diese Röhre giebt einen höheren Resonanzton, der vom *Ä* zum *I* allmählich steigt, während der hintere höhlen-

[1]) Tyndall hat die Zusammensetzung der Vocalklänge nach einer älteren vorläufigen Notiz von mir angegeben. Ich habe den Text nach meinen späteren vollständigeren Versuchen ergänzt. Helmholtz.

förmige Raum einen zweiten tieferen Resonanzton giebt, der beim *I* am tiefsten ist.

Das Eigenthümliche der Vocalklänge ist also, dass die verstärkten Theiltöne eine gleichbleibende absolute Tonhöhe haben, während die Tonhöhe des Grundtones wechselt.

Diese Beispiele erläutern das Thema der Vocalklänge genügend. Wir können die Elementarfarben des Sonnenspectrums in verschiedener Weise mischen und durch diese Mischung unzählige zusammengesetzte Farben erzielen. Ebenso können Elementartöne gemischt werden, so dass sie alle möglichen Schattirungen der Klangfarbe geben. Nachdem Helmholtz die menschliche Stimme in ihre Tonbestandtheile zerlegt hatte, gelang es ihm, die Töne durch Stimmgabeln nachzuahmen, und, indem er diese passend zusammenbrachte, die Klangfarben aller Vocale wiederzugeben.

§. 18. Das Bell'sche Telephon.

Das Ende eines Eisenstabes soll mit einer Spule aus besponnenem Draht umwickelt sein. Zwischen den unbesponnenen Enden dieses Drahtes ist ein Contact hergestellt. Wird nun der Pol eines Stabmagneten dem umwickelten Ende des Eisenstabes genähert, so entsteht in der Drahtspule ein elektrischer Strom und hört auf, sobald die Annäherung aufhört.

Wird der Pol des Magneten von der Spule entfernt, so entsteht, während er sich fortbewegt, ein Strom in entgegengesetzter Richtung.

Kehrt man die Anordnung um, so dass sich der Stabmagnet innerhalb, der Eisenstab ausserhalb der Drahtspule befindet, und nähert und entfernt man das

Eisen abwechselnd, so entstehen, wie oben, nach einander zwei Ströme in entgegengesetzten Richtungen. Je schneller das Eisen hin- und herbewegt wird, um so schneller wechseln natürlich die Ströme.

Eine sehr geringe Bewegung genügt, um solche Ströme zu erzeugen. Man bringe die eine Zinke einer Stimmgabel vor den Stabmagneten mit der Spule; streicht man die Stimmgabel mit dem Bogen, so erregen ihre Schwingungen, so klein sie sind, in der nahen Drahtspule zwei entgegengesetzte Ströme, die mit der Annäherung und Entfernung der Zinke wechseln.

Man leite diese von der Stimmgabel hervorgerufenen Ströme, statt um eine einzelne, um eine zweite, gleichfalls mit einem Magneten versehene Spule. Alsdann wird die Anziehungskraft, welche jener zweite Magnet auf eine zweite in seiner Nähe aufgestellte Stimmgabel ausübt, demselben Wechsel unterworfen sein, wie die Ströme, die den Magneten umkreisen. Der Magnet wird die Zinke abwechselnd anziehen und loslassen und wenn sie dieselbe Schwingungsperiode hat, wie die Gabel, welche den Strom erzeugt, so wird die zweite Gabel im Einklang mit der ersten ertönen. Durch Vermittelung des elektrischen Stromes werden auf diese Weise die Schwingungen der einen Gabel auf die andere übertragen.

Dünne Platten und Membranen sind für Schallschwingungen sehr empfindlich. Streut man z. B. Sand auf eine ausgespannte Membran, so sieht man ihn beben und tanzen, wenn die Stimme auf die Membran einwirkt. Das Trommelfell, welches alle Schwingungen der äusseren Luft aufzunehmen und wiederzugeben vermag, befähigt uns, unendlich verschiedene Geräusche zu hören. Wenn daher eine Platte aus hinreichend dünnem Eisenblech

vor einem unserer Stabmagneten aufgestellt wird und wenn wir diese Platte mit der Stimme in Schwingungen versetzen, so werden diese Schwingungen Ströme erzeugen, wie die Stimmgabel. Ueberträgt man diese Ströme auf eine zweite Spule mit einem zweiten Magneten, so erregen sie in einer vor demselben aufgestellten zweiten dünnen Eisenblechplatte sämmtliche Schwingungen, die der ersten Platte mitgetheilt wurden. Durch Vermittelung des elektrischen Stromes können auf diese Weise gesprochene Worte übertragen werden. Dies ist das Princip des Bell'schen Telephons.

Das Bell'sche Telephon beruht also auf folgender Reihe von Wirkungen: Die dünne Blechplatte nimmt die Schwingungen der menschlichen Stimme auf; der Magnet reagirt auf diese Schwingungen durch geringe Veränderungen seines Magnetismus; diese Veränderungen erzeugen je nach ihrer Stärke, Richtung und Dauer entsprechende elektrische Ströme; diese Ströme endlich können in die Ferne geleitet werden und reproduciren dort genau ebensolche Schwingungen, wie die, denen sie ihre Entstehung verdankten.

Die Erzeugung dieser Ströme und ihrer Gesetze waren schon vor Bell allgemein bekannt. Man wusste recht gut, dass es genügt, ein Stück Eisen in der Nähe eines Magneten hin und her zu bewegen, um einen Strom zu erregen und dass solche Ströme nach Belieben in die Ferne geleitet werden können. Aber Niemand ahnte vor Bell, dass es möglich sei, sie durch die winzigen und complicirten Schwingungen des gesprochenen Wortes zu erzeugen, oder sie so zu übertragen und fortzuleiten, dass sie die menschliche Sprache reproduciren.

§. 19. Das Telephon von Edison.

Bei Edison's Telephon wird der Schall ebenfalls durch Vermittelung des elektrischen Stromes übertragen; die Ströme werden aber anders erzeugt und angewendet. Im Jahre 1879 wurde das Edison'sche Telephon im Hörsaal der Royal Institution vorgeführt. Durch die Güte von Lord John Manners und der Postverwaltung war mir ein Draht zur Verfügung gestellt, der von der Royal Institution nach Piccadilly Circus durch die Luft führte. Die beiden Enden des Drahtes waren an den betreffenden Stationen mit den Röhren der öffentlichen Wasserleitung verbunden; es war also ein geschlossener Kreis hergestellt, durch den ein galvanischer Strom fliessen konnte. An jedem Ende des Luftdrahtes war ein gewöhnliches Kohletelephon (auf das ich gleich zurückkommen werde) in den Stromkreis eingeschaltet. Aber die Mittheilungen aus der Royal Society wurden am Piccadilly Circus durch ein Bell'sches magnetisches Telephon empfangen, das ans Ohr gehalten werden musste, während sich in der Royal Institution ein Edison'sches lautsprechendes Telephon befand. Edison's gleichnamiger Neffe befand sich am Piccadilly Circus, Herr Adams arbeitete mit dem Apparat in der Royal Institution. Ich sprach Stellen aus Shakespeare, Scott, Tennyson, Macauly und Burns in das Kohletelephon; diese wurden am Piccadilly Circus gehört, dort von Herrn Edison wiederholt und kehrten so laut und deutlich zurück, dass man sie im ganzen Hörsaal verstand. Nicht bloss ausgewählte Sätze wurden gehört, sondern ein Gedicht von Emerson wurde bei mir von Anfang bis zu Ende verlesen und Zeile für Zeile

ausserordentlich treu und deutlich zurückgesandt. Einzelne Ausrufe, wie „Ausgezeichnet!“, „Vollkommen befriedigend!“, „Sehr gut!“ wurden pünktlich wiederholt und mit komischer Deutlichkeit vom Publicum gehört. Das Anpassungsvermögen des Apparates zeigte sich vielleicht am schlagendsten bei der Wiedergabe gepfiffener Melodien. Was Herr Edison am Piccadilly Circus pfiff, hörte man in der Royal Institution fast so deutlich, wie an Ort und Stelle. Nach der Vorlesung verliess ich den Apparat auf einige Zeit, während meine Stelle von Anderen eingenommen wurde. Bei meiner Rückkehr sprach ich wieder in das Kohletelephon. Herr Edison bemerkte sofort den Unterschied in der Stimme und gab auf die Frage, wer jetzt spreche, die richtige Antwort. Das neue Instrument reproducirt also in ganz ungewöhnlichem Maasse die verschiedenen Eigenschaften der menschlichen Stimme.

Diese ausserordentlichen Wirkungen wurden mit einem so einfachen und scheinbar so rohen Apparat erzielt, dass man, ohne das Instrument gehört zu haben, kaum an seine Leistungen glauben würde. Ich werde nun versuchen, seinen Bau und seine Wirkungen in gemeinverständlicher Weise zu erklären. Der Beobachter denke sich, dass er die flache Hand auf einen rotirenden Cylinder lege, so dass der ausgeübte Druck eine bedeutende Reibung zwischen dem Cylinder und der Hand erzeugt. Die Rotation soll in solcher Richtung stattfinden, dass die Reibung den Beobachter nach dem Cylinder hinzieht, während er gleichzeitig durch seine Körperstellung dem Zuge widersteht. Wäre die Oberfläche des Cylinders gleichmässig glatt, so würde ein gleichmässiger Reibungswiderstand eintreten und die Körperstellung des Beobachters würde sich nicht ver-

ändern. Man denke sich aber die Oberfläche von ungleichmässiger Beschaffenheit, und zwar bald schlüpfrig wie Eis, bald rauh wie Löschpapier oder Filz. Alsdann wird offenbar bei dem Uebergang von der rauhen haftenden Oberfläche zu der schlüpfrigen die Reibung plötzlich nachlassen. Die Kraft, die zuvor aufgewendet wurde, um den Körper am Vornüberfallen zu verhindern, würde ihn nun veranlassen, hintenüber zu fallen, bis die Hand wieder von einer rauhen Stelle der Oberfläche aufgehalten würde. Ein solcher Cylinder, der gleichmässig rotirte, würde also offenbar durch abwechselndes Gleiten und Haften den Körper des Beobachters in Schwingungen versetzen.

Bei Edison's Telephon haben wir einen kleinen rotirenden Cylinder und einen dünnen Blechstreifen, dessen eines Ende durch eine Feder an den Cylinder angedrückt wird. Das andere Ende dieses metallischen Reibers ist an der Mitte eines dünnen, kreisförmigen Glimmerplättchens befestigt, das etwa 10 cm Durchmesser hat. Der Cylinder besteht aus einer Mischung von pulverisirter Kreide, Quecksilberacetat und Aetzkali, die in einer cylindrischen Form hart gepresst worden ist. Durch die Mitte des Cylinders läuft eine Axe aus Metall. Diese ist verbunden mit dem Ende des Secundärdrahtes einer sehr kleinen Inductionsspule; das andere Ende des Drahtes steht mit dem oben erwähnten dünnen Blechstreifen in Verbindung. Wird der Cylinder angefeuchtet, so wird er zum Elektrolyt, d. h. jeder Strom, der durch ihn hindurchgeht, erzeugt eine Zersetzung, die der Stärke und Dauer des Stromes genau proportional ist.

Der Strom einer kleinen galvanischen Batterie wurde durch den primären Draht des kleinen Inductoriums, dann durch das Kohletelephon, welches ich hielt, und weiter nach Piccadilly Circus geschickt, von wo er unter-

irdisch nach der Royal Institution zurückkehrte. So lange dieser Strom constant blieb, fand keine Einwirkung auf das Edison'sche Telephon statt. Wenn man mit der Hand die Kurbel des Cylinders drehte, so fühlte man einen gleichmässigen Widerstand und das Glimmerplättchen wurde mit constanter Kraft nach innen gezogen. Bei dem Kohletelephon, das zu diesen Versuchen benutzt wurde, ist ein dünner Kuchen von Lampenruss zwischen zwei dünnen Platinscheiben angebracht, gegen deren eine die Stimme anschlägt. Die abwechselnde Verdichtung und Wiederausdehnung des Lampenrusses verändert den Widerstand und bewirkt dadurch Veränderungen in dem galvanischen Strom, die den Schwingungen der Stimme entsprechen. Jede in dem Primärstrom hervorgerufene Veränderung erzeugt einen inducirten Strom in der kleinen Secundärspule, und jeder solche inducirte Strom bewirkt eine entsprechende elektrochemische Zersetzung an der Trennungsfläche zwischen dem Kalkcylinder und dem metallischen Reiber. Durch diese Zersetzung entsteht eine Schmiere unter dem Reiber, der sofort gleitend dem Zuge des Glimmerplättchens nachgiebt. Dieses Gleiten dauert aber nur einen Augenblick, denn gleich wird der Reiber von der rauhen Stelle wieder „gepackt", und diese zieht das Glimmerplättchen nach innen wie zuvor.

Die Schwingungen der Stimme — ihre Töne und Obertöne — wurden also zunächst dem Primärstrom mitgetheilt; jede Veränderung derselben erzeugte entsprechende Secundärströme in der Inductionsspule; die Secundärströme bewirkten eine elektrolytische Zersetzung, welche den metallischen Reiber ins Gleiten brachte und dadurch in Longitudinalschwingungen versetzte, die mit den Schwingungen der Stimme genau übereinstimmten. Diese wurden schliesslich in allen Einzelheiten, bis zu

einem überraschenden Grade unversehrt, dem Glimmerplättchen und von ihm aus der umgebenden Luft mitgetheilt. Man könnte also das Glimmerplättchen als ein vergrössertes Trommelfell ansehen; auch dieses wird, wie das Plättchen, von den Gehörknöchelchen nach innen gezogen. Fast scheint es unglaublich, dass das Glimmerplättchen im Stande sein sollte, die mannigfachen Schwingungen, die beim Pfeifen und Sprechen vorkommen, so scharf und deutlich aufzunehmen und wiederzugeben; allein lange vor Edison hatte ein grösserer Meister durch Erschaffung des Trommelfells dieses Wunder vollbracht.

Die ursprüngliche Beobachtung, aus der sich das laut sprechende Telephon entwickelt hat, machte Edison im Jahre 1872 bei Versuchen mit feuchtem Papier zu telegraphischen Zwecken. Damals bemerkte er jene durch elektrolytische Zersetzung bewirkte Gleitung, die er später so sinnreich verwerthete. Die Schmiere ist wahrscheinlich Wasserstoffgas.

§. 20. Das Mikrophon.

Insofern das Princip des Mikrophons auf raschen Veränderungen eines galvanischen Stromes durch Widerstandsschwankungen beruht, ist es mit dem des Kohletelephons identisch. Das Mikrophon ist jedoch ein anderes Instrument und dient anderen Zwecken. Es wurde von Hughes erfunden. Ein an beiden Enden zugespitzter Kohlestift ist zwischen zwei Becken aus Kohle senkrecht eingespannt. Der Stift muss so lose in dem Becken sitzen, dass er die geringste mechanische oder akustische Erschütterung empfindet. Die beiden Kohlebecken, die den Stift halten, sind mit den beiden Polen einer kleinen galvanischen Batterie verbunden, in deren Stromkreis

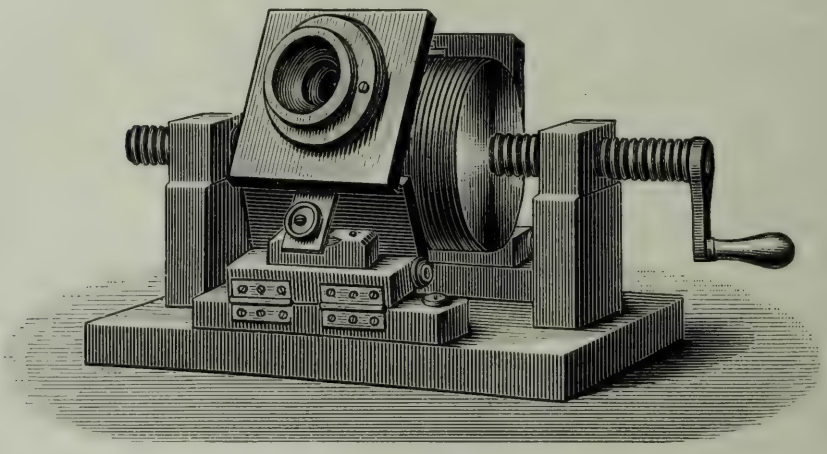
ein Telephon eingeschaltet ist. Der Strom geht von dem einen Pol der Batterie aus durch den Kohlestift und kehrt durch das Telephon nach dem anderen Pol zurück. So lange der Contact zwischen den Kohlestücken nicht verändert wird, bleibt der Strom constant und das Telephon stumm. Aber die geringste Erschütterung des senkrecht eingespannten Stifts verändert den Contact und dadurch den Strom, dessen Schwankungen sich sofort im Telephon anzeigen. Die Erschütterung kann bewirkt werden durch unhörbares Rollen von Wagen auf der Strasse, durch die Stimme, durch Streichen mit einer Bürste, ja selbst durch das Gehen einer grossen Fliege. Daher der Name des Apparats. Man darf sich nicht vorstellen, dass der Schall an sich verstärkt wird; die Wirkung rührt ausschliesslich her von der mechanischen Erschütterung des Kohlestifts. Hierdurch wird die Stromstärke verändert; dem entsprechend verändert sich die Kraft des Telephonmagneten und dieser versetzt wieder durch die Veränderung seiner Anziehungskraft das dünne Eisenblech, welches beim Bell'schen Telephon die unmittelbare Schallquelle ist, in Schwingungen.

§. 21. Der Phonograph.

Dieses Instrument verdanken wir der Erfindungsgabe von Edison. Fig. 109 (a. f. S.) zeigt eine perspectivische Ansicht und Fig. 110 (a. f. S.) einen schematischen Durchschnitt des Phonographen. *C* ist ein Messingcylinder, in dessen Oberfläche von einem Ende zum anderen ein Schraubengang eingeschnitten ist. Durch den Cylinder geht eine Spindel (deutlich erkennbar auf Fig. 109), die ungefähr dreimal so lang ist, wie der Cylinder. Am einen Ende der Spindel ist eine Kurbel

angebracht. Zwischen dieser und dem Cylinder befindet sich ein Gewinde von derselben Steigung, wie die am Cylinder, d. h. acht Umgängen auf den Zoll. Die Spindel dreht sich in zwei Messinglagern, von denen das

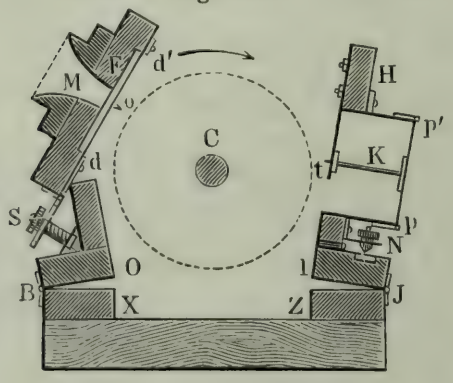
Fig. 109.



eine ein innerliches Gewinde hat, das dem Gewinde auf der Spindel entspricht.

Eine sehr dünne Scheibe aus Eisenblech dd' (Fig. 110) empfängt die Stimme des Sprechenden. Die Scheibe wird mittelst eines Flanschringes aus Messing über einer flachen kreisförmigen Vertiefung festgehalten, die in das Holzgestell F eingeschnitten ist. In der Mitte der Vertiefung befindet sich ein rundes Loch, das sich in das Mundstück M öffnet. Ein sorgfältig polirter kurzer Stift aus gehärtetem Stahl mit stumpfgeschliffener Spitze ist bei o senkrecht in die Mitte der Blechscheibe eingefügt.

Fig. 110.



Auf der anderen Seite des Cylinders befindet sich die Scheibe pp', die den Schall der Stimme reproducirt. Sie besteht aus Pergamentpapier und ist wie eine Trommel über das Ende einer $2^1/_2$ cm langen und 7 cm breiten Messingröhre gespannt, die an dem Holzgestell H befestigt ist. Der Stahlstift t ist mit dem Ende einer stählernen Feder verbunden und deckt sich mit der Mitte der runden Oeffnung in H. Der leichte Holzstab K, der das Pergament und die Feder verbindet, stösst mit dem der Feder zunächst liegenden Ende gegen ein kleines Kautschukkissen und trägt am anderen Ende eine Scheibe aus dünnem Eisenblech von 1,2 cm Durchmesser. Der Druck der Feder verleiht der Scheibe eine sehr schwache convexe Krümmung.

Das quadratische Holzgestell F, auf dem die dünne Blechscheibe ruht, welche die Stimme empfängt, ist mit Scharnieren an ein Stück Holz befestigt, das starr mit o verbunden ist, während o wieder durch die Scharniere B mit X zusammenhängt. Mittelst dieser Scharniere und des Gewindes S kann der Punkt o dem Cylinder in der Weise genähert werden, dass er in die Schraubenwindung auf seiner Oberfläche eingreift. Die Anordnung auf der anderen Seite des Cylinders ist nahezu dieselbe. Bei I und J befinden sich Scharniere und bei N eine Schraubenmutter und eine Spiralfeder, um die Tiefe zu reguliren, bis zu der t in die Schraubenwindung eingreift.

Der Apparat wird auf folgende Weise benutzt. Man klappt die beiden Scheiben zurück, bedeckt den Cylinder mit dickem Stanniol, das man festklebt, und rückt ihn dann mittelst der Kurbel so weit wie möglich nach rechts. Sodann bringt man die beiden Scheiben in die auf Fig. 110 abgebildete Lage, dreht den Knopf bei O, bis der Stift o auf dem Stanniol ruht und lässt den

Cylinder eine halbe Umdrehung machen. dd' wird nochmals zurückgeklappt und wenn die glatte Furche, die entsteht, indem sich das Stanniol an dem Stift entlang bewegt, zu tief oder zu flach ist, so wird die Schraubenmutter etwas nach rechts oder links gedreht. Ist die richtige Stellung gefunden — was nur durch Erfahrung gelernt werden kann —, so wird derselbe Vorgang an der anderen Scheibe wiederholt. Jetzt ist der Apparat arbeitsfertig. Der Stift o wird auf das Stanniol gesenkt, die Scheibe pp' bleibt aufgeklappt, wie auf der Figur. Nun dreht man den Griff gleichmässig mit einer Geschwindigkeit von ungefähr einer Umdrehung in der Secunde, während gleichzeitig deutlich in das Mundstück M hineingesprochen wird. Ist die Rede zu Ende, so wird die Scheibe dd' vom Stanniol entfernt und die eingeritzte Furche zeigt eine Reihe von Einkerbungen, die dadurch entstanden sind, dass der Stift die Schwingungen der Stimme mitgemacht hat. Der Cylinder wird nun in seine ursprüngliche Lage zurückgeschraubt und der Stift t auf seiner anderen Seite in die Furche gesenkt. Wieder wird die Kurbel gedreht, so dass die Einkerbungen auf dem Stanniol unter dem Stift vorüberziehen. Der ursprüngliche Vorgang wird auf diese Weise umgekehrt; die Einkerbungen theilen dem zweiten Stifte genau dieselben Bewegungen mit, welche der erste Stift ausführte, als er die Kerbe machte. Die Schwingungen von t werden durch den Stab auf die Pergamentscheibe pp', von dieser auf die Luft übertragen und erzeugen Töne von nahezu derselben Höhe und Klangfarbe wie die, welche die Blechscheibe in Bewegung versetzten. Um den Ton zu verstärken, kann man einen 30 cm langen Trichter aus steifem Papier über die Röhre pp' stülpen.

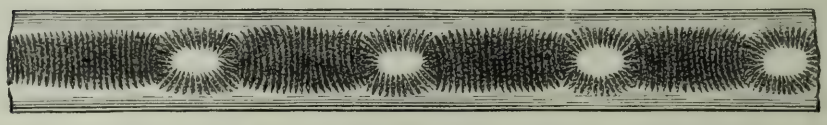
Man könnte auch dieselbe Scheibe, welche die Einkerbungen macht, benutzen, um den Schall zu reproduciren; in der That sind viele Apparate nach diesem System gebaut. Die hier geschilderte Anordnung ergiebt jedoch die besten Resultate. Ich verdanke die Beschreibung Herrn Shelford Bidwell.

§. 22. Versuche von Kundt. — Neue Methoden, die Schallgeschwindigkeit zu bestimmen.

Sie haben schon die Töne einer Glasröhre, die an beiden Enden frei ist, gehört, und haben sich bekannt gemacht mit den verschiedenen Theilungsarten derselben, wenn sie in Längsschwingungen versetzt wird. Sie wissen, dass, wenn die Röhre ihren Grundton giebt, ihre beiden Hälften sich rasch hinter einander verlängern und verkürzen. Wenn die Röhre an beiden Enden verschlossen wäre, so würden die geschlossenen Enden ihre Schwingungen an die Luft in der Röhre übertragen, und wenn die Schallgeschwindigkeit in der Luft der Geschwindigkeit in Glas gleich wäre, so würde die Luft der Röhre im Einklange mit der Röhre selbst vibriren. Aber die Schallgeschwindigkeit in der Luft ist viel geringer als in Glas, und wenn daher die Luftsäule in gleichem Rhythmus mit der Röhre schwingen soll, so muss sie sich zu dem Zwecke in schwingende Abschnitte von passender Länge theilen. In einer höchst interessanten Untersuchung von Kundt, die in Poggendorff's Annalen veröffentlicht ist, wird angegeben, wie diese Abschnitte sichtbar zu machen sind. In eine 2 m lange Röhre wird etwas Lykopodiummehl gebracht und durch Schütteln über deren ganze innere Oberfläche vertheilt, so dass überall etwas Mehl daran haftet. Nun

verschliesse ich die Röhre an beiden Enden, fasse sie in der Mitte mit der Hand oder noch besser mit einem Schraubstock, und reibe mit einem nassen Tuche schnell über eine der Hälften. Augenblicklich fällt das Mehl, das soeben noch an der inneren Fläche hing, auf den Boden der Röhre und bildet da Figuren, wie auf Fig. 111.

Fig. 111.



Die Anordnung des Mehles zeigt, wie die Luftsäule getheilt war. Ein Kranz von Mehl umgiebt jeden Knoten, während sich das Mehl zwischen den Knoten längs der Schwingungsbäuche in Querstreifen anordnet.

Sie werden leicht sehen, dass wir hier mit Luft wesentlich denselben Versuch machen, wie ihn Melde mit einem schwingenden Faden ausführte. Wenn der Faden zu lang war, um als Ganzes zu schwingen, passte er sich den Anforderungen der dazu gehörigen Stimmgabel an, indem er sich in eine Reihe von schwingenden Abschnitten theilte. Nun beträgt jedesmal die Entfernung von einem Knoten zum nächsten die halbe Länge der Tonwelle. Wie Sie sehen, haben wir bei diesem Versuch sechszehn halbe Tonwellen in unserer Röhre. (Die Abbildung zeigt nur vier.) Aber die Länge unserer longitudinal schwingenden Glasröhre entspricht auch wiederum einer halben Wellenlänge in Glas. Also ist im vorliegenden Falle bei gleicher Schwingungszahl die Länge der halben Welle in Glas 16 mal so gross, als die Länge der halben Welle in Luft. Mit anderen Worten: Die Schallgeschwindigkeit in Glas ist 16 mal so gross, als die Schallgeschwindigkeit in Luft. Auf diese Weise lösen wir

durch einmaliges Entlangstreifen mit einem nassen Tuche eine höchst wichtige Frage. Wie aber Kundt gezeigt hat, brauchen wir uns nicht auf Luft zu beschränken. Bringen wir irgend ein anderes Gas in die Röhre, so können wir ebenso gut durch einfaches Streichen mit dem nassen Tuche das Verhältniss der Schallgeschwindigkeit in diesem Gase und in Glas bestimmen. Bei Wasserstoff ist die Zahl der Schwingungsbäuche kleiner, bei Kohlensäure ist sie grösser, als in Luft.

Aus der bekannten Schallgeschwindigkeit in der Luft, verglichen mit der Länge einer Staubfigur, können wir sofort die Zahl von Schwingungen ableiten, die in einer Secunde von der Röhre ausgeführt werden. Wenn ich eine Röhre in der Mitte festlege und mit einem nassen Tuch über eine der Hälften streiche, errege ich einen schrillen Ton. Jede Staubfigur in der Röhre ist 7,5 cm lang. Folglich beträgt die Länge dieser Tonwelle 15 cm. Die Schallgeschwindigkeit in Luft beträgt bei der gegenwärtigen Temperatur 342 m in der Secunde, eine Strecke, welche 2280 unserer Tonwellen umfasst. Diese Zahl giebt also die Anzahl der Schwingungen, welche die Glasröhre in der Secunde ausgeführt hat.

Statt die Mitte der Röhre zum Knotenpunkt zu machen, können wir ebenso gut einen anderen ihrer Theilpunkte wählen. Fasse ich sie z. B. an einem Punkte, der auf der Hälfte zwischen der Mitte und dem einen Ende liegt, und reibe sie, so theilt sie sich bekanntlich in drei schwingende Theile, getrennt durch zwei Knoten. Wir wissen, dass der Ton, der bei dieser Theilung entsteht, die Octave desjenigen ist, den die Röhre giebt, wenn der Knoten in der Mitte liegt, denn die Schwingungen sind nun doppelt so schnell. Wenn wir also die Röhre statt durch einen, durch zwei Knoten

theilen, so wird das Mehl nicht 16, sondern 32 Schwingungsbäuche zeigen. Dasselbe findet natürlich auf alle anderen Gase Anwendung.

Kundt füllte vier Röhren mit Luft, Kohlensäure, Leuchtgas und Wasserstoff, rieb sie in der Weise, dass zwei Knoten entstanden und fand, dass die Zahl der Staubfiguren, die sich längs der Röhre bildeten, in den einzelnen Fällen die folgenden waren:

Luft	32	Staubfiguren
Kohlensäure	40	„
Leuchtgas	20	„
Wasserstoff	9	„

Nimmt man die Geschwindigkeit in der Luft als Einheit an, so drücken die folgenden Brüche das Verhältniss dieser Geschwindigkeit zu der in anderen Gasen aus:

Kohlensäure	$\frac{32}{40} = 0{,}8$
Leuchtgas	$\frac{32}{20} = 1{,}6$
Wasserstoff	$\frac{32}{9} = 3{,}56$

Wie man sich aus einer in der ersten Vorlesung mitgetheilten Tabelle erinnern wird, hat Dulong durch ein ganz anderes Verfahren festgestellt, dass die Geschwindigkeit in Kohlensäure 0,86- und in Wasserstoff 3,8 mal so gross ist, als die Geschwindigkeit in Luft. Er bediente sich zu seinen Versuchen der Töne von Orgelpfeifen, die mit verschiedenen Gasen gefüllt waren; wir aber kommen auf die einfachste Weise in nahe Uebereinstimmung mit seinen Ergebnissen. Bestäuben wir die innere Fläche solcher Röhren, füllen sie mit den gehörigen Gasen und schmelzen ihre Enden zu, so können sie beliebig lange Zeit aufbewahrt werden.

Wenn wir dann im gegebenen Moment eine der Röhren schütteln, so wird ihre innere Fläche dünn mit Staub überzogen, und dann bringt ein einziger Strich mit dem nassen Tuche die Theilung hervor, aus welcher die Schallgeschwindigkeit des Gases augenblicklich ersehen werden kann.

Savart fand, dass sich um eine longitudinal schwingende Röhre eine spiralförmige Knotenlinie bildet, und Seebeck zeigte, dass diese Linie nicht von Längsschwingungen, sondern von secundär entstehenden Querschwingungen herrühre. Bei den vorliegenden Versuchen complicirt diese spiralförmige Knotenlinie die Staubfiguren. Es ist daher wünschenswerth, so zu verfahren, dass keine solche Linie entsteht. Kundt hat diesen Zweck dadurch erreicht, dass er die Längsschwingungen in einer Röhre und die Theilung in Schwingungsbäuche in einer anderen Röhre erzeugte, in der die erste wie ein Stempel steckte. Sie sehen hier eine Glasröhre (Fig. 112 a. f. S.), die 5 cm lang ist und 2,10 m inneren Durchmesser hat. Das eine Ende dieser Röhre füllt der bewegliche Stöpsel b; das andere Ende kk ist ebenfalls durch einen Kork geschlossen. Die engere Röhre Aa geht durch denselben hindurch und ist in der Mitte von dem Kork KK fest umschlossen. Das Ende der inneren Röhre ist ebenfalls durch einen überstehenden Kork a geschlossen, der die weitere Röhre beinahe ausfüllt, aber doch so lose darin sitzt, dass seine Reibung gegen die innere Fläche zu gering ist, um die Schwingungen der Röhre zu hindern. Nachdem ich die innere Fläche zwischen a und b leicht mit dem Mehl bestäubt habe, fahre ich mit einem nassen Tuche schnell über AK und augenblicklich theilt sich das Mehl zwischen a und b in eine Anzahl von Schwingungsbäuchen. Ist die Länge der Luftsäule ab gleich der der

Glasröhre Aa, so ist die Zahl der Schwingungsbäuche 16. Ist, wie in der Abbildung, ab nur halb so lang als Aa, so ist die Zahl der Schwingungsbäuche 8.

Fig. 112.

Dieses Verfahren kann die ausgedehntesten Anwendungen erfahren. Statt der Glasröhre Aa können wir einen Stab von einer anderen festen Substanz, z. B. von Holz oder Metall, anwenden, und so das Verhältniss ihrer Schallgeschwindigkeit zu der der Luft bestimmen. An Stelle der Glasröhre kann ein Messingstab von gleicher Länge benutzt werden. Reibe ich ihn mit einem eingeharzten Tuch, so theilt sich die Säule ab in eine Anzahl von Schwingungsbäuchen, wie sie dem Schwingungstempo des Metalles entspricht. Auf diese Weise behandelte Kundt Messing, Stahl, Glas und Kupfer, und sein Verfahren ergab sehr genaue Resultate. Nimmt man, wie zuvor, die Schallgeschwindigkeit in der Luft als Einheit an, so erhält man für das Verhältniss der Schallgeschwindigkeit in Messing zu der in Luft in drei verschiedenen Versuchsreihen folgende Zahlen:

Erster Versuch	10,87
Zweiter „	10,87
Dritter „	10,86

Die Uebereinstimmung ist hier ungewöhnlich gross. Um zu zeigen, welcher Genauigkeit diese Methode fähig ist, wurde die Länge der einzelnen Staubfiguren gemessen und es ergab sich, dass in 27 Versuchen diese Länge zwischen 43 und 44 mm

schwankte, ohne die eine oder die andere Zahl je ganz zu erreichen. Die Länge des Metallstabes, verglichen mit der Länge einer dieser so genau messbaren Staubfiguren, ergiebt sofort das Verhältniss zwischen der Schallgeschwindigkeit in dem Metall und der in Luft.

Drei verschiedene Versuche, in derselben Weise ausgeführt, ergaben folgende Geschwindigkeit in Stahl, wenn die Geschwindigkeit in Luft als Einheit angenommen wurde:

Erster Versuch	15,34
Zweiter „	15,33
Dritter „	15,34

Hierbei ist die Uebereinstimmung ebenso vollkommen, wie bei den Versuchen mit Messing.

In Glas fand sich durch diese neue Methode als Werth der Schallgeschwindigkeit

15,25 [1])

In Kupfer endlich ergab sich die Geschwindigkeit als

11,96.

Diese Resultate stimmen auffallend gut mit denen überein, die durch andere Methoden gefunden sind. Wertheim z. B. fand die Schallgeschwindigkeit in Stahldraht 15,108; Kundt findet sie 15,34. Ferner fand Wertheim die Geschwindigkeit in Kupfer = 11,17; Kundt findet sie 11,96. Die Unterschiede sind nicht so gross, dass man sie nicht den Unterschieden in dem von beiden Beobachtern gebrauchten Material zuschreiben könnte.

Die Länge der Luftsäule kann entweder ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge sein, oder nicht, je nach der Schwingungsdauer des Stabes. Ist sie es nicht, so neh-

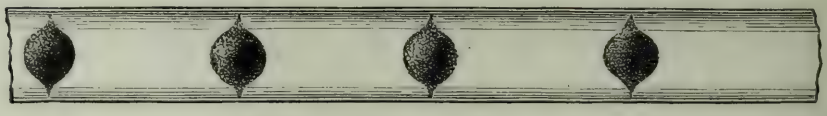
[1]) Die Geschwindigkeit in Glas richtet sich nach der Qualität des Glases, also bezieht sich das Resultat jedes Versuches nur auf die besondere Art von Glas, die dabei angewendet wurde.

men die Staubfiguren gewöhnlich die auf Fig. 113 abgebildete Form an. Wenn aber mittelst des Stöpsels *b*

Fig. 113.

die Luftsäule zu einem ganzen Vielfachen der Wellenlänge gemacht ist, so verlässt das Mehl die Schwingungs-

Fig. 114.



bäuche ganz und gar und bildet, wie in Fig. 114, an den Knoten kleine, einzelstehende Häufchen.

§. 23. Erklärung einer Schwierigkeit.

Hierbei stellt sich nun eine Schwierigkeit ein. Das geschlossene Ende *b* der Röhre (Fig. 112) ist natürlich eine Stelle, wo keine Schwingung stattfindet, so dass sich unter allen Umständen da, wie an den Knoten, ein Mehlhäufchen bildet; aber sobald die Länge der Luftsäule einem Vielfachen der Wellenlänge genau gleich war, fand Kundt auch stets ein Mehlhäufchen dicht bei dem Ende *a* des Stabes. So schien die Stelle, von der die ganze Schwingung ausging, selbst ohne Schwingung zu sein. Kundt machte auf diese Schwierigkeit aufmerksam, versuchte aber nicht, sie zu erklären. Wir sind jetzt im Stande, es zu thun. In der dritten Vorlesung hatte ich Gelegenheit zu bemerken, dass, streng genommen, ein Knotenpunkt nicht eine Stelle ohne Schwingung, sondern eine Stelle *geringster* Schwingung ist, und dass sehr starke Schwingungen entstehen

können, wenn sich die schwachen Anstösse, welche der Knotenpunkt abgiebt, regelmässig addiren. Die Enden von Kundt's Röhre sind solche Punkte geringster Bewegung, und die schwingenden Abschnitte sind immer so lang, dass in Folge der Vereinigung ankommender und zurückgeworfener Wellen die Luft an einem Punkte, der einen halben Schwingungsbauch vom Ende der Röhre entfernt liegt, viel stärker vibrirt, als an diesem Ende selbst. Diese Summirung der einzelnen Stösse geschieht um so regelmässiger, je genauer die Länge der Luftsäule ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge ist. Daher kommt es, dass in diesem Falle die Schwingungen heftig genug werden, um das Mehl von den schwingenden Abtheilungen ganz fort zu fegen. Ein entsprechendes Beispiel geben Melde's Versuche, in denen die Stimmgabeln die Quelle aller Bewegung, und dabei doch selbst Knoten sind. Die schwingende Zunge einer Clarinette ist auch ein Knoten.

Ein Versuch von Helmholtz kann hier lehrreiche Anwendung finden. Ich setze eine Stimmgabel, die 512 ganze Schwingungen in der Secunde ausführt, auf die Saite des in der dritten Vorlesung beschriebenen Monochords. Gegenwärtig hören Sie keine Steigerung des Tones der Stimmgabel; die Saite bleibt in Ruhe. Schiebe ich aber die Gabel an der Saite entlang, so geht bei der Zahl 33 plötzlich ein lauter Ton von der Saite aus. Bei der jetzt angewendeten Spannung ist die Länge 33 mit den Schwingungen der Gabel in genauem Einklang. Durch Vermittelung der Saite kann die Stimmgabel also ihre Bewegung dem Resonanzboden und durch diesen der Luft mittheilen. Lasse ich die Gabel an der richtigen Stelle ruhen, so hält der Ton so lange an, wie die Gabel schwingt. Die geringste Abweichung nach

rechts oder links von diesem Punkte verursacht ein plötzliches Abnehmen des Tones. Bei stärkerer Spannung verschwindet er. Rücke ich die Gabel weiter, so kommt der Ton bei der Zahl 36 wieder zum Vorschein. Ziehe ich die Saite noch fester an, so finde ich bei Zahl 40 den Punkt, wo der Ton am stärksten ist. Wenn die Saite gelockert wird, muss sie natürlich verkürzt werden, um mit der Gabel übereinzustimmen. Rücke ich nun die Gabel gegen das Ende der Saite, so erhalte ich bei Zahl 25 den früheren Ton. Wieder bringe ich die Gabel auf 35; man hört nichts. Aber bei vorsichtigem Spannen der Saite entferne ich, so zu sagen, den Punkt des Einklanges weiter vom Ende der Saite. Er erreicht endlich die Gabel und in demselben Augenblick geht ein klarer, voller Ton vom Resonanzboden aus. Jedesmal, ehe der bestimmte Punkt erreicht wird, hören wir in seiner unmittelbaren Nähe „Schläge“ oder Schwebungen, die, wie wir später sehen werden, vom Zusammenwirken des Tones der Gabel mit dem der Saite herrühren, wenn beide beinahe, aber noch nicht ganz in Uebereinstimmung sind.

Obgleich bei allen diesen Versuchen die Schwingungen von der Gabel ausgingen, war doch jedesmal der Punkt, auf welchem die Gabel ruht, ein Knotenpunkt. Er bildet das verhältnissmässig feste Ende des Drahtes, dessen Schwingungen mit denen der Gabel übereinstimmen. Der Versuch ist demjenigen analog, bei dem man einen Gummischlauch in der Hand hält und in Schwingung versetzt, oder auch dem Versuch mit der Stimmgabel von Melde. Eine Wirkung ganz derselben Art erzielte auch Kundt, als das Ende der Luftsäule, mit seinem schwingenden Stab in Berührung gesetzt, sich als ein Knoten und nicht als die Mitte eines Schwingungsbauches erwies.

§. 24. Umsetzung strahlender Wärme in Schall.

Wir kommen nun zu einer Reihe von Versuchen, bei denen musikalische Töne nach einer neuen und lehrreichen Methode erzeugt werden.

Herr Graham Bell zeigte zuerst, dass ein intermittirender Lichtstrahl, der auf Scheiben aus fester Materie auffällt, schwache aber deutliche musikalische Töne erzeugt. Sobald ich diese Versuche sah, gelangte ich zu der Ueberzeugung, dass die Töne durch rhythmische Absorption und Emission der strahlenden Wärme entstehen.

Die Körper absorbiren die Wärme in verschiedenem Grade. Die Strahlen eines Kohlefeuers gehen z. B. viel leichter durch Steinsalz als durch Glas. Deshalb wird Glas durch Feuer erwärmt, Steinsalz nicht. Die Durchlässigkeit eines Körpers für strahlende Wärme bezeichnet man mit dem Ausdruck diatherman. Steinsalz ist also stärker diatherman als Glas. Nicht selten springen die Linsen in den elektrischen Lampen durch die Wärme, welche sie absorbiren. Hätten wir Linsen aus Steinsalz, so würde dies nicht geschehen.

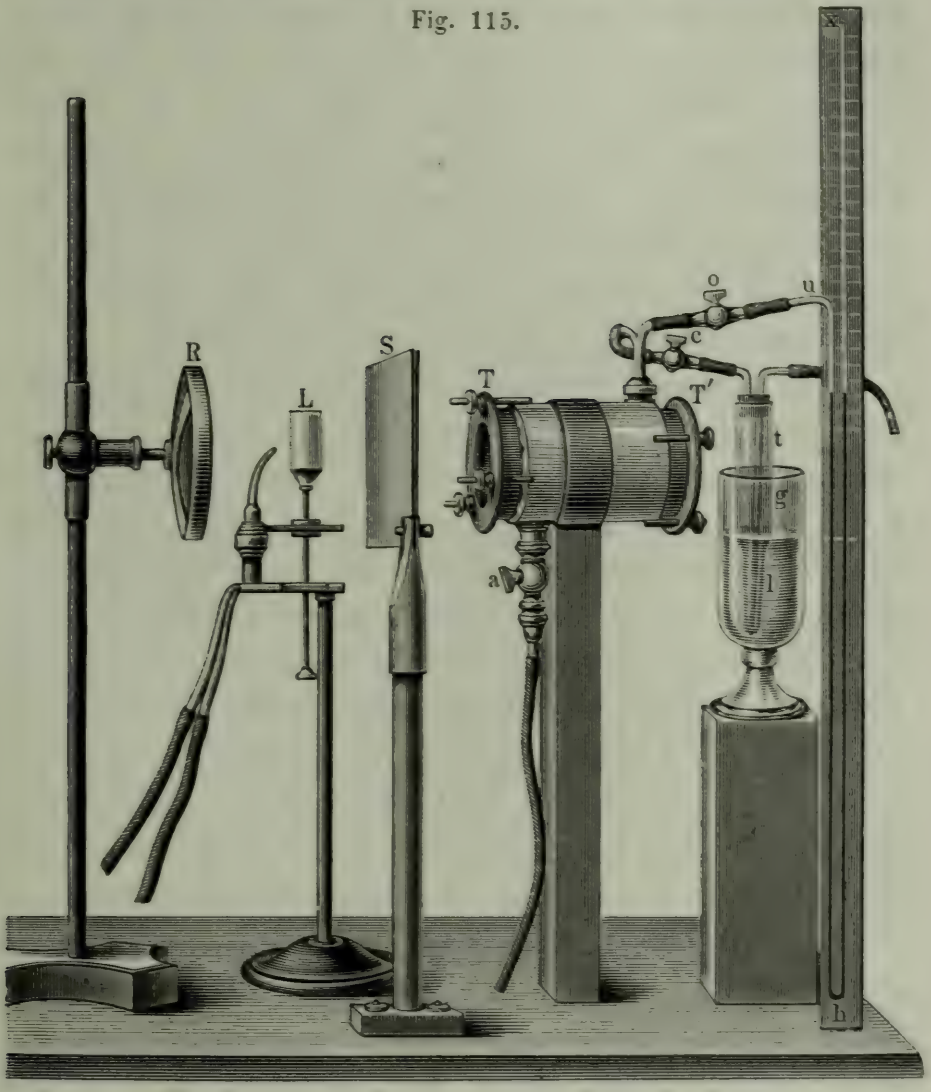
Gasförmige und dampfförmige Körper zeigen in Bezug auf die Absorption strahlender Wärme ähnliche Verschiedenheiten. Einige sind in hohem Grade diatherman, andere ausserordentlich adiatherman oder undurchlässig. Ein vollkommen diathermanes Gas würde die strahlende Wärme hindurchlassen, ohne seine Temperatur im Geringsten zu verändern. Gewöhnliche Luft ist z. B. fast vollständig diatherman; ist sie trocken, so können die kräftigsten Wärmestrahlen hindurchgehen, ohne sie zu erwärmen. Wenn Gas erwärmt wird, dehnt es sich aus;

wenn es abgekühlt wird, zieht es sich zusammen. Lässt man nun einen intermittirenden Lichtstrahl auf ein Gas fallen, so dehnt es sich aus, wenn er das Gas trifft und zieht sich zusammen, wenn er abgeblendet wird. Erfolgt diese abwechselnde Ausdehnung und Zusammenziehung in hinreichend rascher Folge, so ist anzunehmen, dass dadurch Tonpulse oder musikalische Töne entstehen. Da nun der Grad der Ausdehnung von der Menge der absorbirten strahlenden Wärme abhängt, so kann man aus der Stärke, mit der ein Gas tönt, schliessen, wie stark es die strahlende Wärme absorbirt.

Der nachstehend beschriebene Apparat zeigt, dass Gase die strahlende Wärme absorbiren und dadurch in verschiedenem Grade ausgedehnt werden. TT', Fig. 115, ist eine 10 cm lange und 7,5 cm breite Glasröhre. Sie ist an beiden Enden mit einem Flansch aus Messing versehen, der ihren Durchmesser auf 6,3 cm verkleinert. Gegen diesen Flansch sind durchsichtige Steinsalzplatten luftdicht befestigt. Die Dichtigkeit der Röhre ist durch gründlich gefettete Gummiplättchen oder auch durch Kitt gesichert. Ein Hahn a am einen Ende von TT' steht in Verbindung mit einer Manometerröhre und einer Luftpumpe. Ein T-Stück am anderen Ende ist durch seinen einen Arm mit einem Reagenzglase verbunden, das in ein mit Wasser gefülltes Gefäss g eintaucht. Das Reagenzglas ist mit einem (hier nicht abgebildeten) Reinigungsapparat verbunden, der aus zwei U-Röhren besteht. Die eine enthält Stücke carrarischen Marmors, der mit Aetzkali angefeuchtet ist, die andere Glasstücke, die mit Schwefelsäure angefeuchtet sind. Ehe die Luft in diese U-Röhren eintritt, wird sie durch einen Wattepfropfen von schwebenden Stofftheilchen befreit. Der andere Arm des T-Stückes ist mit einem

U-förmig gebogenen dünnen Glasrohr *uhx* verbunden, dessen beide Schenkel eine farbige Flüssigkeit enthalten. Die Flüssigkeit ist, wenn sie in beiden Schen-

Fig. 115.



keln das gleiche Niveau hat, 350 mm hoch, während sich der freie Schenkel von *u* (auf der Zeichnung verkürzt) etwa 500 mm über die Oberfläche der Flüssigkeit erhebt. Als Wärmequelle dient der Kalkcylinder *L*, den eine Leuchtgasflamme mit Sauerstoffgebläse zum Weissglühen bringt. Die Strahlen des Kalkcylinders

werden durch den auf der Vorderseite versilberten Hohlspiegel R aufgefangen und in einem convergirenden Strahl durch die Manometerröhre TT' gesandt. Der Brennpunkt des Strahls befindet sich innerhalb der Röhre am entfernteren Ende derselben. Das Gas und der Sauerstoff entströmen Behältern, die eigens zu diesem und ähnlichen Zwecken gebaut sind; lange erfolglose Versuche mit Gas aus den öffentlichen Gasanstalten oder mit comprimirtem Gas in eisernen Bomben haben gelehrt, dass selbstständige Gasbehälter, deren Druck constant erhalten werden kann, unentbehrlich sind.

Die Versuche werden in folgender Weise ausgeführt: Das Reagenzglas t (Fig. 115) enthält die Flüssigkeit, deren Dämpfe untersucht werden sollen. Durch den Kork, der das Reagenzglas verschliesst, geht eine enge Glasröhre, die nahe am Boden des Reagenzglases und ziemlich tief unter der Oberfläche der Flüssigkeit in eine feine Mündung ausläuft. Um tief gehen zu können und Flüssigkeit zu sparen, ist die untere Hälfte des Reagenzglases in die Länge gezogen, wie die Abbildung zeigt. Eine zweite enge Röhre geht ebenfalls luftdicht durch den Kork und endet unmittelbar darunter. Beide Röhren sind oberhalb des Korkes im rechten Winkel gekrümmt. Nachdem die Manometerröhre TT' ausgepumpt worden ist, öffnet man den Hahn c und lässt die von Kohlensäure, Feuchtigkeit und schwebenden Stofftheilchen befreite Luft in Blasen durch die Flüssigkeit im Reagenzglase t aufsteigen, von wo sie in die Manometerröhre übergeht. Um Sauerstoff zu sparen, liess ich in den Pausen zwischen zwei Versuchen nur das Leuchtgas brennen. Ist die Manometerröhre gefüllt, was bei allen Versuchen durch eine gleich grosse Oeffnung geschehen muss, so wird der Sauerstoff entzündet und der Cylinder

eine Minute lang der verstärkten Flamme ausgesetzt. Während dieser Zeit fängt der silberne Schirm die Strahlung auf. Nach Ablauf einer Minute wird der Schirm entfernt und der Strahl fällt nunmehr durch die Mischung von Luft und Dämpfen. Sofort sinkt die Flüssigkeit in dem näheren Schenkel der engen U-Röhre, während sie in dem anderen Schenkel entsprechend steigt. Die Höhe, bis zu der sich die letztere Flüssigkeitssäule über ihren auf der Millimeterscala mit 0 bezeichneten Ausgangspunkt erhebt, wird genau gemessen. Das Doppelte dieser Höhe ergiebt die Niveaudifferenz zwischen den beiden Schenkeln der U-Röhre und dieser „Wasserdruck" bildet ein Maass für die Zunahme der Expansion des Gases durch die Absorption strahlender Wärme [1]).

Es folgen einige der auf diese Weise ausgeführten Messungen:

Dämpfe.

Zunahme der Expansion durch strahlende Wärme.

Name der Flüssigkeit	Wasserdruck	Beschaffenheit des Tons
1. Aether	300 mm	sehr stark
2. Pentan	279 „	„ „
3. Aceton	267 „	„ „
4. Ameisensäureester	261 „	„ „
5. Essigsäureester	248 „	„ „
6. Buttersäureester	183 „	stark
7. Ameisensäure	180 „	„
8. Valeraldehyd	172 „	„
9. Valeriansäureester	168 „	„
10. Essigsäurepropylester	166 „	„
11. Benzol	117 „	mässig
12. Kohlensäureester	108 „	„
13. Allyljodid	92 „	„

[1]) Das hier angewandte und erweiterte Verfahren ist durch Herrn Röntgen eingeführt.

Name der Flüssigkeit	Wasserdruck	Beschaffenheit des Tons
14. Chloroform	89 mm	mässig
15. Schwefelkohlenstoff	81 „	„
16. Cyanmethyl	64 „	schwach
17. Tetrachlorkohlenstoff	58 „	„
18. Xylol	44 „	„
19. Amylalkohol	42 „	„
20. Amyljodid	42 „	„

Das Absorptionsvermögen von Gasen wurde mit demselben Apparat festgestellt mit folgenden Resultaten:

Gase.

Name des Gases	Wasserdruck
Methylchlorid	350 mm
Aldehyd	325 „
Aethylen	315 „
Aether	300 „
Stickoxydul	198 „
Sumpfgas	164 „
Kohlensäure	144 „
Kohlenoxyd	116 „
Sauerstoff	5 „
Wasserstoff	5 „
Stickstoff	5 „
Trockene Luft	5 „
Feuchte Luft bei 50° C.	130 „

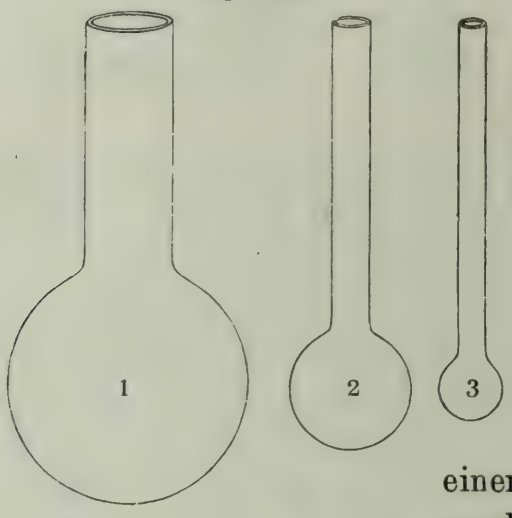
Aether ist hier angeführt, um diese Tabelle mit der vorstehenden zu verbinden. Von allen bisher untersuchten gasförmigen Körpern besitzt Methylchlorid das stärkste Absorptions- und Klangvermögen; während trockene Luft, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff sich unter den kräftigsten Strahlen so gut wie stumm verhalten. Auf das Methylchlorid folgt das Aldehyd mit einem Siedepunkt von 21° C. Die Zahl 5, die den Elementen und der trockenen Luft beigefügt ist, bezeichnet nicht die Absorption strahlender Wärme, sondern die Ausdehnung in Folge des Contacts mit dem leicht erwärmten Apparat. Das Stickoxydul wurde einer eisernen

Bombe entnommen, in der es zu medicinischen Zwecken aufbewahrt wurde. Bei einigen meiner Versuche absorbirte Sumpfgas besser als Stickoxydul; so z. B. bei Versuchen, die ich im Frühjahr 1880 mit dem Manometer anstellte. Das Sumpfgas, mit dem dieses Resultat erzielt wurde, war mit grosser Sorgfalt in unserem chemischen Laboratorium hergestellt.

Die Temperatur von 50° C. bei dem Versuch mit feuchter Luft erzielte ich in einer hölzernen Kammer, die ich in unserem Laboratorium errichten liess. Durch diese Kammer sind zwei 10 cm weite Blechröhren geleitet, welche die Wärme und Verbrennungsproducte von zwei grossen Brennern befördern. Die Kammer ist 7,35 m lang, 3,67 m breit und 6,30 m hoch. Die Temperatur der Luft kann darin leicht auf 60° C. gebracht werden. Bei dem oben angeführten Versuch entnahm ich die Luft dem äusseren Laboratorium mittelst einer Röhre, die durch die Holzwand der Kammer geleitet war. Die Luft stieg dann in Blasen durch Wasser auf, das einige Zeit in der warmen Kammer gestanden hatte. Die Mischung aus Luft und Dampf war bei ihrem Eintritt in das Manometer einige Grade kühler als dieses. Bei genauer Untersuchung erwiesen sich alle seine Theile blank und trocken, wenn sich die mit Dämpfen beladene Luft darin befand. Liess man den Strahl des (aus Leuchtgas und Sauerstoff erzeugten) Kalklichtes durch die Mischung fallen, so stieg die Säule sofort um 65 cm. Wurde der Strahl abgeblendet, so sank sie rasch wieder auf Null. Das Doppelte von 65, also 130 mm, ergiebt die Niveaudifferenz zwischen den beiden Schenkeln der U-Röhre.

Musikalische Töne werden diesen Gasen und Dämpfen auf folgende Art entlockt: Man bringt etwas von der flüchtigen Flüssigkeit in eine kleine Flasche und lässt sie verdampfen, bis die Luft in der Flasche oberhalb der Flüssigkeit gesättigt ist. Flaschen oder Kolben von der auf Fig. 116, 1, 2, 3 abgebildeten Grösse erwiesen sich als sehr zweckmässig. Das Intermittiren des Strahls wurde anfangs mit einer 40 cm grossen, radial geschlitzten Zinkblechscheibe erzielt; später bediente ich mich einer ebenso grossen Scheibe, die mit einem Zahnrand versehen war. Die Scheibe war senkrecht auf einer Schwungmaschine angebracht und rotirte quer durch den Strahl nahe am Brennpunkt des Hohlspiegels. Unmittelbar hinter der Scheibe befand sich die Flasche mit dem zu untersuchenden Gas oder Dampf, während ein Gummischlauch mit einer hohlen, zugespitzten Mündung aus Elfenbein oder Buchsbaum die Flasche mit dem Ohre verband. Mit diesem einfachen Apparat erhält man überraschend starke Töne von sämmtlichen Gasen und Dämpfen, die bei meinen früheren Versuchen starkes Absorptionsvermögen für strahlende Wärme gezeigt hatten. Die zuletzt angewandte Anordnung ist auf Fig. 117 abgebildet.

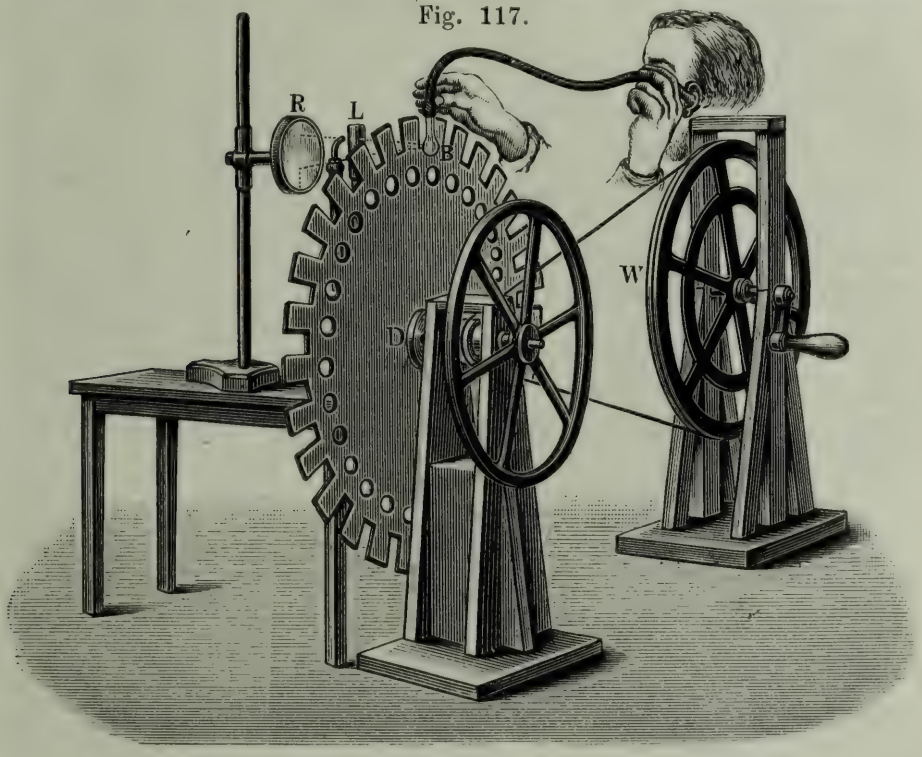
Fig. 116.



Als Wärmequelle dient der sorgfältig centrirte Kalkcylinder L, der durch eine Knallgasflamme erhitzt wird. Die Strahlen aus dieser Quelle werden von dem

Hohlspiegel R aufgefangen und auf den Kolben B concentrirt, der die zu untersuchende Flüssigkeit enthält. Der Kolben ist mit einem zum Ohre führenden Gummischlauch verbunden. Das Intermittiren der Wärmestrahlen bewirkt die Scheibe D aus starker Pappe, die 60 cm Durchmesser hat und am Rande mit 29 Zähnen nebst den entsprechenden Lücken versehen ist [1]). Die Scheibe wird in Rotation versetzt durch das Rad W,

Fig. 117.



mit dem es durch einen Riemen gekuppelt ist. Die Lage des tönenden Kolbens und des Hörrohres ist aus dem Bilde ersichtlich. Bei Gasen, die leichter sind als Luft, wird der Kolben B umgekehrt. Bei schweren Gasen steht er aufrecht. Bei der Untersuchung von Dämpfen wird ein wenig von der Flüssigkeit in den Kolben ge-

[1]) Das Intermittiren kann auch bewirkt werden durch eine Reihe gleich weit von einander entfernter runder Löcher; siehe die Abbildung.

gossen und geschüttelt, so dass die Dämpfe in die Luft über der Flüssigkeit aufsteigen. Der Kolben befindet sich in dem am stärksten concentrirten Theil des Strahls.

Mit diesem Apparat habe ich wiederholt das Klangvermögen von 10 Gasen und etwa 80 Dämpfen geprüft. Als Tonerzeuger steht Methylchlorid obenan. Gleich darauf folgen Aldehyd, Aethylen und Aether. Die beiden letzteren sind einander fast gleich. Die Flüchtigkeit der flüssigen Substanz, der die Dämpfe angehören, ist natürlich ein wichtiger Factor des Erfolges. Denn so gross das Absorptionsvermögen der einzelnen Molekel sein mag, die Wirkung bleibt gering, wenn nur eine beschränkte Zahl von Molekeln vorhanden ist. Schwach absorbirende Dämpfe können bis zu einem gewissen Grade durch die Masse ihrer Molekeln das Unvermögen der einzelnen Molekel ausgleichen. Einige Beispiele werden indessen genügen, um zu zeigen, dass die specifische Wirkung der Molekeln zuweilen über die Wirkung der Flüchtigkeit den Sieg davon trägt. Schwefelkohlenstoff mit einem Siedepunkt von 42° C. tönt schwächer als Essigsäureester mit einem Siedepunkt von 74°. Tetrachlorkohlenstoff siedet bei 77°, tönt aber lange nicht so stark wie Acetol, das bei 104° siedet. Chloroform mit einem Siedepunkt von 61° tönt schwächer als Valeraldehyd mit einem Siedepunkt von 100° oder auch nur Valeriansäureester mit einem Siedepunkt von 144°. Methylcyanid siedet bei 82°, tönt aber schwächer als Essigsäurepropylester mit einem Siedepunkt von 102°. Ein Blick auf die vorstehende Tabelle wird zeigen, wie sich die Intensität des Tones mit dem Absorptionsvermögen der Dämpfe verändert; sie durchläuft alle Stufen von „sehr stark“ bei Aether mit 300 mm Wasserdruck, durch „stark“, „mässig“ und schwach“ bis herab zum

Amyljodid, dessen Ausdehnung durch strahlende Wärme nur einen Wasserdruck von 42 mm erzeugt.

Besonders interessant war mir die Reaction von Wasserdampf, wegen seiner Allgegenwart und der vielen Erörterungen, deren Gegenstand er gewesen ist. Ich glaubte anfangs nicht, dass die geringe Menge von Wasserdampf, die bei gewöhnlichen Temperaturen in der Luft verbreitet ist, wahrnehmbare Töne zu erzeugen im Stande sei. Bei meinem ersten Versuch brachte ich daher Wasser in einer Flasche fast auf den Siedepunkt. Ich erwärmte die Flasche oberhalb des Wassers mit einer Spiritusflamme, um jede Spur von Nebel zu entfernen und brachte dann den klaren Dampf in den intermittirenden Strahl. Mit diesem Versuch stellte ich gleichsam dem Wasserdampf die Frage, ob er Absorptionsvermögen für strahlende Wärme besitze oder nicht. Er antwortete mit einem musikalischen Ton, der, in richtiger Weise auf das Trommelfell concentrirt, so laut klang wie ein Orgelton. Verminderte ich die Temperatur von 100 auf 10°, so verschwand der Ton nicht, wie ich erwartete, sondern blieb deutlich und stark. Die Flaschen wurden bei diesen Versuchen nach verschiedenen Methoden getrocknet, die ich an anderer Stelle beschrieben habe und die sich jedem Beobachter von selbst darbieten werden. Nimmt man sie offen aus dem Laboratorium, und bringt sie in den intermittirenden Strahl, so tönen sie stets bis zu einem gewissen Grade. Stellt man sie neben Schwefelsäure unter den Recipienten einer Luftpumpe und lässt sie dort trocknen, so verstummen sie. Die geringste Beimischung von feuchter Luft bringt sie wieder zum Tönen. Wenn man nur einen Augenblick in eine trockene und stumme Flasche hinein athmet, zeigt sie sofort ein starkes Klangvermögen.

Uebersicht der fünften Vorlesung.

Wenn ein gespannter Draht in Richtung seiner Länge in geeigneter Weise gerieben wird, so wird er in Längsschwingung versetzt. Der Draht kann entweder als Ganzes schwingen oder sich in schwingende Abschnitte theilen, die durch Knoten von einander geschieden sind.

Die Töne eines solchen Drahtes folgen der Zahlenreihe 1, 2, 3, 4 u. s. w.

Die *Quer*schwingungen eines an beiden Enden befestigten Stabes folgen nicht in derselben Reihe, wie die Querschwingungen eines gespannten Drahtes. Denn die Kräfte, die hier ins Spiel kommen, sind von anderer Art, wie dies in der vierten Vorlesung erklärt wurde. Für die Längsschwingungen eines gespannten Drahtes aber gilt dieselbe Reihenfolge der Töne als für die Längsschwingungen eines an beiden Enden festen Stabes; denn hier wirkt in beiden Fällen die gleiche Kraft, nämlich die Elasticität des Stoffes.

Ein Stab, der an einem Ende befestigt und in Längsschwingungen versetzt ist, schwingt entweder als Ganzes oder theilt sich dabei in zwei, drei, vier u. s. w. schwingende Theile, die durch Knoten von einander getrennt sind. Die Folge der Töne eines solchen Stabes entspricht den ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 u. s. f.

Ein Stab, der an beiden Enden frei ist, kann ebenfalls Längsschwingungen ausführen. Sein tiefster Ton entspricht einer Theilung des Stabes in zwei schwingende Abschnitte mit einem Knoten in der Mitte. Die Obertöne eines solchen

Stabes entsprechen seiner Theilung in drei, vier, fünf u. s. w. schwingende Abschnitte, die durch zwei, drei, vier u. s. w. Knoten von einander getrennt sind. Die Folge der Töne eines solchen Stabes entspricht den Zahlen 1, 2, 3, 4, 5 u. s. w.

Wir können diese Ordnung auch so ausdrücken, dass wir sagen, die Töne eines Stabes, der an beiden Enden befestigt ist, entsprechen den ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 u. s. w., während die Töne eines Stabes, der an beiden Enden frei ist, den geraden Zahlen 2, 4, 6, 8 u. s. w. entsprechen.

An den Stellen, wo die Schwingung am stärksten ist, erleidet der Stab keinen Wechsel der Dichtigkeit; an den Knoten dagegen erreicht die Veränderung der Dichtigkeit ein Maximum. Dies kann durch die Einwirkung des Stabes auf polarisirtes Licht bewiesen werden.

Luftsäulen von bestimmter Länge resoniren zu Stimmgabeln von bestimmter Schwingungsdauer. Die Länge der Luftsäule, die am vollkommensten zu einer Gabel resonirt, beträgt ein Viertel der Tonwelle, welche die Gabel hervorruft.

Diese Resonanz beruht auf der Uebereinstimmung, welche zwischen dem Schwingungstempo der Gabel und dem der Luftsäule besteht.

Bläst man über die Oeffnung einer Röhre, die an einem Ende geschlossen ist, so entsteht ein Schwirren der Luft, und eine Reihe von Stössen dieses Geschwirres kann durch die Resonanz der Röhre zu einem musikalischen Ton erhoben werden.

Der Ton ist derselbe, welcher gehört wird, wenn man eine Stimmgabel, deren Schwingungsdauer der der Röhre entspricht, über die Oeffnung der Röhre hält.

Wenn eine Röhre, die an einem Ende verschlossen ist — zum Beispiel eine gedackte Orgelpfeife —, ihren tiefsten Ton giebt, so ist die Luftsäule in ihrem Inneren von keinem Knoten getheilt. Die Obertöne einer solchen Säule entsprechen derselben Theilungsart, wie sie bei einem Stabe vorkam, der an einem Ende befestigt war und Längsschwingungen ausführte. Ihre Töne folgen sich wie die ungeraden Zahlen

1, 3, 5, 7 u. s. w. Dass sie in dieser Ordnung stehen müssen, geht aus der Weise hervor, in welcher sich die Säule theilt.

Bei Orgelpfeifen wird die Luft dadurch in Schwirrung versetzt, dass man sie durch eine enge Spalte treibt und auf eine scharfe Kante stossen lässt. Von dem dadurch erregten Geschwirr wird eine Reihe von Stössen durch Resonanz der Pfeife zum musikalischen Ton erhoben. Wenn statt des Schwirrens der Luft eine Stimmgabel von passender Schwingungsdauer vor den Mund einer Orgelpfeife gehalten wird, so spricht die Pfeife an, der Gabel gleichsam antwortend. Beim Anblasen schafft sich die Orgelpfeife selbst ihre Stimmgabel, indem sie die bewegte Luftschicht vor ihrer Mundöffnung zwingt, im Tact mit ihr zu vibriren.

Der Ton einer offenen Orgelpfeife ist eine Octave höher als der einer gedackten von derselben Länge. Dies Verhältniss ist eine nothwendige Folge ihrer verschiedenen Schwingungsart.

Wenn zum Beispiel eine gedackte Orgelpfeife ihren tiefsten Ton giebt, so ist, wie schon gesagt, die Luftsäule ungetheilt. Wenn eine offene Pfeife ihren tiefsten Ton giebt, so ist die Säule durch einen Knoten in der Mitte getheilt. Die offene Pfeife besteht eigentlich aus zwei gedackten, die mit ihrem gedackten Ende vereinigt sind. Daraus wird klar, dass der Ton einer offenen Pfeife derselbe sein muss, als der einer gedackten von der halben Länge.

Die Länge einer gedackten Pfeife beträgt ein Viertel der Tonwelle, die sie erzeugt, während die Länge einer offenen Pfeife gleich der Hälfte ihrer Tonwelle ist.

Die Töne einer offenen Pfeife folgen der Ordnung der geraden Zahlen 2, 4, 6, 8 u. s. w. oder der ganzen Zahlen 1, 2, 3, 4 u. s. w.

Sowohl bei gedackten als bei offenen Pfeifen steht die Zahl der Schwingungen, die in bestimmter Zeit ausgeführt werden, in umgekehrtem Verhältniss zu der Länge der Pfeife.

Die Stellen grösster Schwingung sind auch bei Orgelpfeifen mit geringster Veränderung der Dichtigkeit verbunden,

während an den Stellen geringster Schwingung die grösste Veränderung der Dichtigkeit stattfindet.

Die Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern kann aus den Tönen berechnet werden, welche von gleichen Längen gegeben werden; oder aus den Längen der Substanzen, die gleiche Töne geben.

Zungen werden oft mit schwingenden Luftsäulen in Verbindung gebracht. Sie bestehen aus biegsamen Plättchen, die in einer rechtwinkligen Oeffnung hin und her schwingen und dadurch den Luftstrom unterbrechen, der durch die Oeffnung geht.

Die Zunge übt dieselbe Thätigkeit wie die Sirene.

Die biegsamen Holzzungen, die manchmal mit Orgelpfeifen in Verbindung stehen, werden gezwungen, im Einklange mit der Luftsäule in der Pfeife zu vibriren. Andere Zungen aber sind zu steif, um von der schwingenden Luft beherrscht zu werden, und in diesem Falle wird die Luftsäule so lang gemacht, dass ihre Schwingungen mit denen der Zunge zusammen treffen.

Indem wir passende Pfeifen mit Zungen in Verbindung bringen, geben wir ihren Tönen die Eigenschaften der menschlichen Stimme.

Das Stimmorgan des Menschen ist ein Zungeninstrument, indem die schwingende Zunge durch elastische Bänder gebildet wird, die am oberen Ende der Luftröhre sitzen und verschiedener Spannung fähig sind. Das Schwingungstempo dieser Stimmbänder wird nicht wesentlich von der Resonanz des Mundes beeinflusst; aber der Mund kann durch Veränderung seiner Form dazu gebracht werden, entweder für den Grundton oder für jeden der Obertöne der Stimmbänder mit zu tönen.

Durch das Verstärken besonderer Töne vermöge der Resonanz des Mundes wird die Klangfarbe der Stimme verändert.

Die verschiedenen Vocalklänge entstehen durch verschiedene Mischungen des Grundtones mit den Obertönen der Stimmbänder.

Das Telephon von Bell beruht in erster Linie darauf, dass eine dünne Blechscheibe die Schwingungen der menschlichen Stimme aufnimmt; der Magnet reagirt alsdann auf diese Schwingungen durch geringe Veränderungen seines Magnetismus; diese Veränderungen erzeugen je nach ihrer Dauer, Richtung und Stärke elektrische Ströme; diese Ströme endlich können in die Ferne geleitet werden und dort genau ebensolche Schwingungen reproduciren, wie die, denen sie ihre Entstehung verdanken.

Beim Edison'schen Telephon ist das Hauptagens ein gewöhnlicher galvanischer Strom, der den ganzen Stromkreis durchläuft. An einer gewissen Stelle des Stromkreises befindet sich, mit sanftem Druck zwischen zwei dünnen Platinscheiben eingeschaltet, ein dünner Kuchen aus Lampenruss. Der Strom geht durch die Platten hindurch. Gegen eine derselben schlägt die Stimme an, ihre Schwingungen verändern den Contact zwischen dem Platin und der Kohle und erzeugen dadurch entsprechende Veränderungen in der Stärke des galvanischen Stromes.

An einer anderen Stelle des Stromkreises ist eine kleine Inductionsspule eingeschaltet, durch deren primären Draht der galvanische Strom hindurchgeht. Jede Veränderung in der Stärke des galvanischen Stromes inducirt einen Strom in dem Secundärdraht der kleinen Inductionsspule. Die inducirten Ströme gehen aus dem metallischen Reiber auf einen Cylinder über, der aus einer Mischung von pulverisirter Kreide und gewissen mineralischen Salzen besteht, die in einer Form gepresst und mit Wasser angefeuchtet sind. Der Cylinder wird mit der Hand gedreht. Die elektrolytische Wirkung der inducirten Ströme verändert die Reibungsverhältnisse zwischen dem Cylinder und dem Reiber. Der Cylinder bewegt sich daher stossweise, entsprechend den Schwingungen der Stimme. Diese Stösse werden einer dünnen, mit dem Reiber verbundenen Glimmerplatte mitgetheilt und reproduciren die Stimme, der sie ihre Entstehung verdanken.

Beim Mikrophon geht ein galvanischer Strom durch zwei leicht gegen einander gedrückte Kohlestücken. Ein Bell'-

sches Telephon ist ebenfalls in den Stromkreis eingeschaltet. Die geringste Erschütterung, selbst der Schritt eines Insects, verändert den Contact zwischen den Kohlestückchen und erzeugt entsprechende Veränderungen in der Stärke des Stromkreises, der durch das Telephon geht. Diese Veränderungen beeinflussen den Telephonmagneten, der eine dünne Blechplatte in Schwingungen versetzt und auf diese Weise gleichsam den Schritt des Insects hörbar macht. Allein man darf nicht vergessen, dass dem Insect dabei lediglich die mechanische Rolle zufällt, den Contact der Kohlestückchen zu verändern.

Beim Phonographen werden die Schwingungen der Stimme von einer dünnen Blechscheibe aufgefangen und auf einen Stift übertragen, der sanft gegen einen mit Stanniol überzogenen Cylinder drückt. Rotirt der Cylinder, so entstehen Einkerbungen im Stanniol. Derselbe Stift, oder besser ein anderer, wird dann über die Einkerbungen hingeführt. Diese versetzen den Stift in Schwingungen und reproduciren in überraschender, wenn auch ziemlich unvollkommener Weise die Stimme, durch welche sie entstanden.

Wenn die feste Substanz einer Röhre, die an einem oder beiden Enden geschlossen ist, in Längsschwingungen versetzt wird, so geräth die Luft darin ebenfalls in Schwingung.

Bedeckt man die innere Fläche einer Röhre mit einem leichten Mehl, so kann man sehen, in welcher Weise sich die Luftsäule theilt. Aus der Theilung der Säule lässt sich dann das Verhältniss zwischen der Schallgeschwindigkeit in der Substanz der Röhre und der in der Luft bestimmen.

Statt der Luft kann man auch andere Gase anwenden und deren Schallgeschwindigkeit im Vergleich mit der Geschwindigkeit in der Substanz der Röhre bestimmen.

Mittelst eines in Längsschwingungen versetzten Stabes kann man die in einer Röhre eingeschlossene Luft in Schwingung setzen und zwingen, sich in Schwingungsbäuche zu theilen. Diese Schwingungsbäuche können durch leichtes Mehl sichtbar gemacht werden; aus ihnen berechnet man

die Schallgeschwindigkeit in der Substanz des Stabes, verglichen mit der Geschwindigkeit in der Luft.

Auf diese Weise kann die verhältnissmässige Schallgeschwindigkeit in allen festen Körpern, die sich in Stäbe formen und in Längsschwingungen versetzen lassen, bestimmt werden.

Gase und Dämpfe sind in verschiedenem Grade diatherman. Ein vollkommen diathermaner Körper würde keine strahlende Wärme absorbiren und nur solche Gase und Dämpfe, die sie absorbiren, erleiden eine Temperaturveränderung. Werden absorbirende Gase oder Dämpfe einem intermittirenden Strahl ausgesetzt, so dehnen sie sich aus, wenn der Strahl sie trifft und ziehen sich wieder zusammen, wenn er abgeblendet wird. Diese rhythmische Wirkung erzeugt Tonpulse, die sich, wenn sie hinreichend schnell erfolgen, zu einem musikalischen Ton vereinigen.

Die Stärke des Tones hängt davon ab, wie stark die strahlende Wärme absorbirt wird. Sie erreicht ihr Maximum bei Methylchlorid, das am stärksten absorbirt, und ihr Minimum bei trockener Luft, deren Absorptionsvermögen gleich Null ist.

Sechste Vorlesung.

Singende Flammen. — Einfluss der Röhre, welche die Flamme umgiebt. — Einfluss der Grösse der Flamme. — Harmonische Töne der Flammen. — Wirkung des Einklangs auf singende Flammen. — Einwirkung des Schalles auf freie Flammen. — Versuche mit Fischschwanz- und Fledermausbrennern. — Versuche mit schmalen Flammen. — Ausserordentliche Empfindlichkeit der Flammen als akustische Reagentien. — Die Vocalflamme. — Wirkung des Sprechens auf Flammen. — Wirkung von musikalischen Tönen auf unentzündete Gasstrahlen. — Bildung und Form von Wasserstrahlen. — Theorie von Plateau über das Zerfallen flüssiger Strahlen in Tropfen. — Einfluss musikalischer Töne auf Wasserstrahlen. — Ein Wasserstrahl kann sich in Bezug auf Empfindlichkeit mit dem Ohre messen.

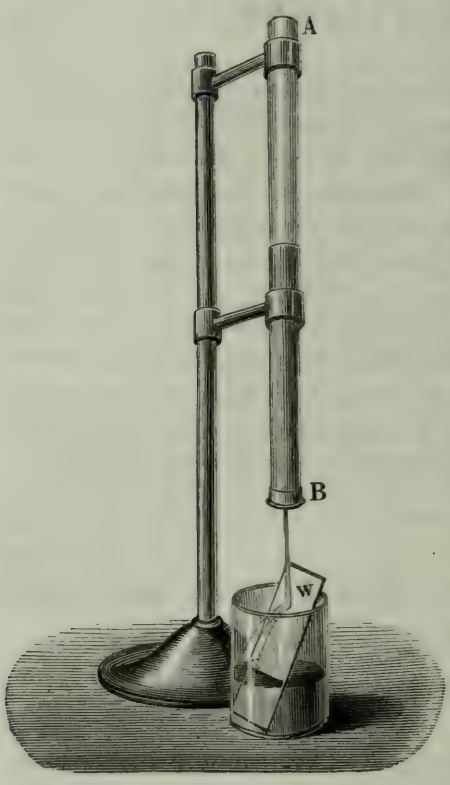
---

§. 1. Reibungsrhythmus: Musikalisch tönendes Ausströmen einer Flüssigkeit aus einer engen Oeffnung.

Jede Reibung ist rhythmisch. Wenn wir mit einem geharzten Bogen über eine Saite streichen, so regelt die Spannung der Saite vollkommen genau den Rhythmus der Reibung. Wenn wir mit dem nassen Finger auf dem Rande eines Glases entlang fahren, so giebt sich die Theilung der reibenden Bewegung in rhythmisch wiederholte Stösse durch einen musikalischen Ton zu erkennen. Savart's schöne Versuche beweisen, dass selbst die Reibung einer Flüssigkeit gegen die Seiten der Oeffnung, durch welche sie geht, im Stande ist,

musikalische Töne hervorzubringen. Wir sind hier in der Lage, seinen Versuch zu wiederholen. Die Röhre AB (Fig. 118) ist mit Wasser gefüllt und ihr Ende B durch eine Messingplatte mit einer kleinen kreisförmigen Oeffnung geschlossen, deren Durchmesser der Dicke der Platte gleich ist. Nehme ich den kleinen Zapfen fort, der die Oeffnung schloss, so fliesst das Wasser aus, und während es in der Röhre fällt, geht ein sehr weicher musikalischer Ton von der flüssigen Säule aus. Dieser Ton entsteht dadurch, dass das Wasser intermittirend durch die Oeffnung fliesst und dadurch die ganze Säule über derselben in Schwingung versetzt wird. Wenn man Thee aus einer Theekanne giesst, so zeigt sich die Neigung zu solcher rhythmischen Bewegung in den kreisförmigen Riefen des fallenden Strahles. Dieselbe Unterbrechung bemerkt man in dem schwarzen dichten Rauch, der in rhythmischen Ringen dem Schornstein eines Dampfbootes entweicht. Das unangenehme Geräusch ungeölter Maschinen ist ebenfalls eine Bestätigung der Thatsache, dass die Reibung nicht continuirlich ist, sondern von einem wechselnden Packen und Loslassen der reibenden Flächen herrührt.

Fig. 118.



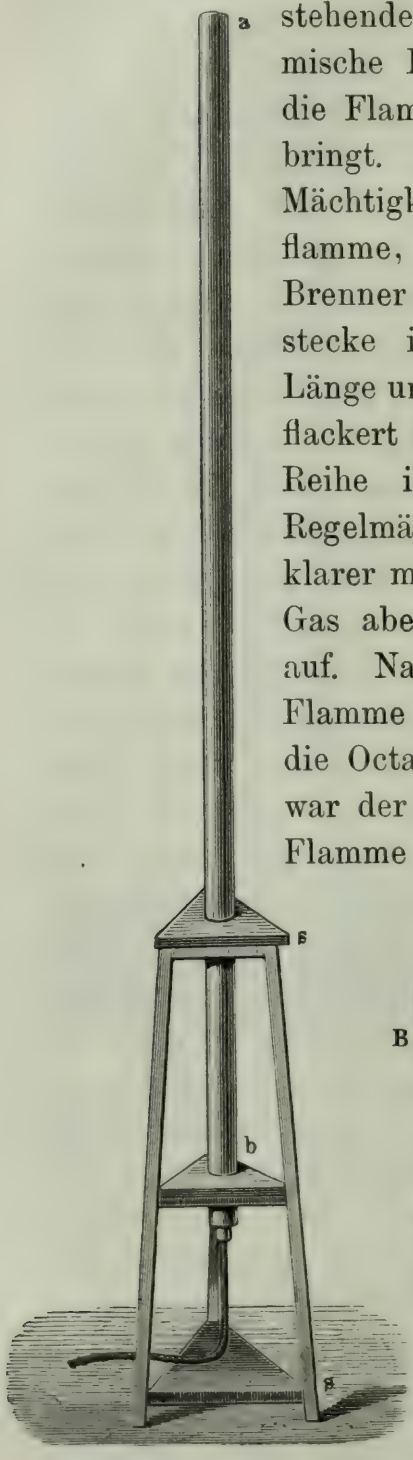
Auch bei Gasen ist die Reibung eine intermittirende. Eine Flintenkugel pfeift auf ihrem Wege durch die Luft,

und wenn der Wind einen Tannenwald schüttelt, so bringt seine Reibung gegen die Stämme und Aeste der Bäume ein Geräusch hervor, wie fallendes Wasser. Bewegt man ein ruhig brennendes Licht schnell durch die Luft, so entsteht ein gezackter Lichtstreifen, der auf Unterbrechung deutet, während der fast musikalische Ton, welcher die Erscheinung des Streifens begleitet, der hörbare Ausdruck des Rhythmus ist. Wenn man andererseits sanft gegen eine Kerzenflamme bläst, so zeigt das schwirrende Geräusch rhythmische Bewegung an. Wir haben bereits gesehen, was erreicht werden kann, wenn eine Pfeife mit diesem Geschwirr in Verbindung gebracht wird; wir wissen, dass die Pfeife eine besondere Reihe von Stössen aus der Menge wählt und sie durch Resonanz zum musikalischen Ton erhebt. In gleicher Weise kann das Geräusch einer Flamme benutzt werden. Die Flamme dieses Gebläses giebt zum Beispiel statt ihres gewöhnlichen Geschwirrs eine Art von musikalischem Brausen, wenn sie in eine passende Röhre eingeschlossen wird. Die gewählte Welle wirkt bald wieder auf die Flamme ein und hebt grossentheils die anderen Wellen auf, so dass die Flamme gezwungen wird, in entsprechendem Tact mit der Welle zu vibriren. Und diese Einwirkung kann so mächtig werden, der tactmässige Ansturz der zurückgeworfenen Wellen zu solcher Ausdehnung anschwellen, dass dadurch sogar eine sehr grosse Flamme ausgelöscht werden kann.

§. 2. Singende Flammen.

Man braucht dieses Geschwirr nicht durch irgend welche aussergewöhnlichen Mittel zu erzeugen. Lässt man eine Gasflamme einfach in einer Röhre brennen,

Fig. 119.



so genügt gewöhnlich der darüber entstehende Luftzug, um die nöthige rhythmische Bewegung zu erzeugen, welche die Flamme ganz von selbst zum Singen bringt. Dieser Ton kann sich zu grosser Mächtigkeit erheben. Ueber eine Gasflamme, die aus einem kreisförmigen Brenner mit 28 Oeffnungen hervor brennt, stecke ich eine Zinnröhre von 1,50 m Länge und 5 cm Durchmesser. Die Flamme flackert zuerst, aber bald klärt sich die Reihe ihrer Stösse zu vollkommener Regelmässigkeit und es entsteht ein tiefer, klarer musikalischer Ton. Wenn ich das Gas aber herunter drehe, hört der Ton auf. Nach einer kurzen Pause giebt die Flamme einen anderen Ton, und zwar die Octave des vorigen. Der erste Ton war der Grundton der Röhre, welche die Flamme einschliesst, der zweite ist der erste Oberton. Wir haben hier wie bei den Orgelpfeifen eine Luftsäule, die sich in Schwingungsbäuche, getrennt durch Knoten, theilt.

Eine noch stärkere Wirkung lässt sich durch diese grössere Röhre *a b* (Fig. 119) erzielen, die, 4,50 m lang und 10 cm weit, zu

einem ganz anderen Zweck bestimmt war. Sie wird von einem festen Ständer *ss'* gehalten und ich schiebe den dünnen Brenner, der bei *B* in grösserem Mafsstabe gezeichnet ist, in sie hinein. Sie hören am Anfange das Geschwirr und nun auch den mächtigeren Ton. Schiebe ich die Flamme weiter hinein, so wird die Bewegung stärker, bis endlich ein wahrhaft donnernder Ton aus der Röhre hervorbricht. Dann aber plötzlich verstummt sie, denn die Rückwirkung ihrer eigenen Wellen hat die Flamme ausgelöscht. Ich zünde die Flamme wieder an, mache sie aber sehr klein. Wird sie in die Röhre gebracht, so singt sie von Neuem; aber nun ist es einer der Obertöne, den Sie hören. Drehe ich den Hahn weiter auf, so verstummt der Ton, einen Augenblick ist alles still; allein der Sturm bereitet sich schon vor und bald bricht ein tönender Orkan los. Mache ich die Flamme kleiner, so hört der Grundton auf und Sie hören den ersten Oberton der Röhre. Drehe ich sie noch weiter herunter, so verschwindet der erste Oberton und der zweite kommt heraus. Da sich nun Ihr Ohr an diese Töne gewöhnt hat, mache ich die Flamme noch einmal gross. Mit dem tiefsten Ton gemischt, hören Sie gleichsam die Obertöne kämpfen, um im allgemeinen Lärm der Flamme auch gehört zu werden. Mit einem grossen Bunsen'schen Rosenbrenner kann der Ton dieser Röhre so gesteigert werden, dass er in diesem Zimmer den Fussboden, die Sitze und die grosse Zuhörerschaft darauf zu erschüttern vermag, während das Verlöschen der Flamme durch die Rückwirkung der Tonwellen von einem Knall angezeigt wird, der fast so laut ist wie ein Pistolenschuss. Ein Kamin ist, wie Sie bemerken werden, eine Röhre dieser Art in grossem Mafsstabe und das Brausen der Flamme im Kamin nur ein roher Versuch, Musik zu machen.

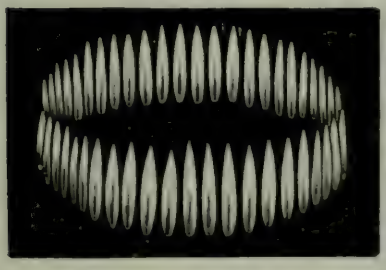
Ich gehe nun zu kürzeren Röhren und kleineren Flammen über. Bringe ich Röhren von verschiedener Länge über acht kleine Flammen, so fängt jede an zu singen, und wie Sie sehen, werden die Töne tiefer, je länger die Röhren sind. Die Röhren sind in solcher Länge gewählt, dass sie hinter einander die acht Töne der Tonleiter geben. An einigen bemerken Sie einen Papierschieber *s* (Fig. 120), durch den die Resonanzröhre verkürzt oder verlängert werden kann. Rücke ich den Schieber hinauf, während die Flamme singt, so wird der Ton augenblicklich tiefer. Rücke ich den Schieber hinunter, so steigt der Ton. Diese Versuche beweisen, dass die Flamme von der Röhre beherrscht wird. Durch die Einwirkung der auf die Flamme zurückgeworfenen Wellen wird ihr Geschwirr tactmässig, während die Länge des Tactes, wie bei den Orgelpfeifen, von der Länge der Röhre bestimmt wird.

Fig. 120.

Die Fixsterne haben, besonders in der Nähe des Horizontes, ein unruhiges Licht und wechseln beim

Funkeln manchmal die Farbe. Oft habe ich bei Nacht auf den Höhen der Alpen die grösseren und tiefer stehenden Sterne abwechselnd wie Rubinen und Smaragde aufleuchten sehen. Stellt man einen Spiegel so auf, dass man darin das Bild eines solchen Sternes sehen kann und wendet dann den Spiegel schnell hin und her, so erscheint darin keine continuirliche Lichtlinie, sondern eine farbige Perlenschnur von ausserordentlicher Schönheit. Man erreicht dieselbe Wirkung, wenn man einen Operngucker auf den Stern richtet und ihn hin und her bewegt. Dieser Versuch lehrt, dass beim Funkeln das Licht der Sterne stellenweise verschwindet, da die dunklen Räume zwischen den hellen Perlen solchen Augenblicken des Verlöschens entsprechen. Unsere singende Flamme ist nun eine funkelnde Flamme. Sie bemerken eine gewisse zitternde Bewegung, wenn sie zu singen anfängt, und können diese Bewegung eben so gut zerlegen, wie die des Sternes[1]). Ich habe nun einen kleinen Spiegel so aufgestellt, dass ich das Bild dieser Flamme darin sehen kann. Drehe ich den Spiegel, so dass das Bild einen Lichtkreis geben muss, so ist der leuchtende Streifen nicht ununterbrochen, wie er sein würde, wenn die Flamme vollkommen ruhig wäre, sondern er zerfällt in eine zierliche Kette von Flammen (Fig. 121).

Fig. 121.

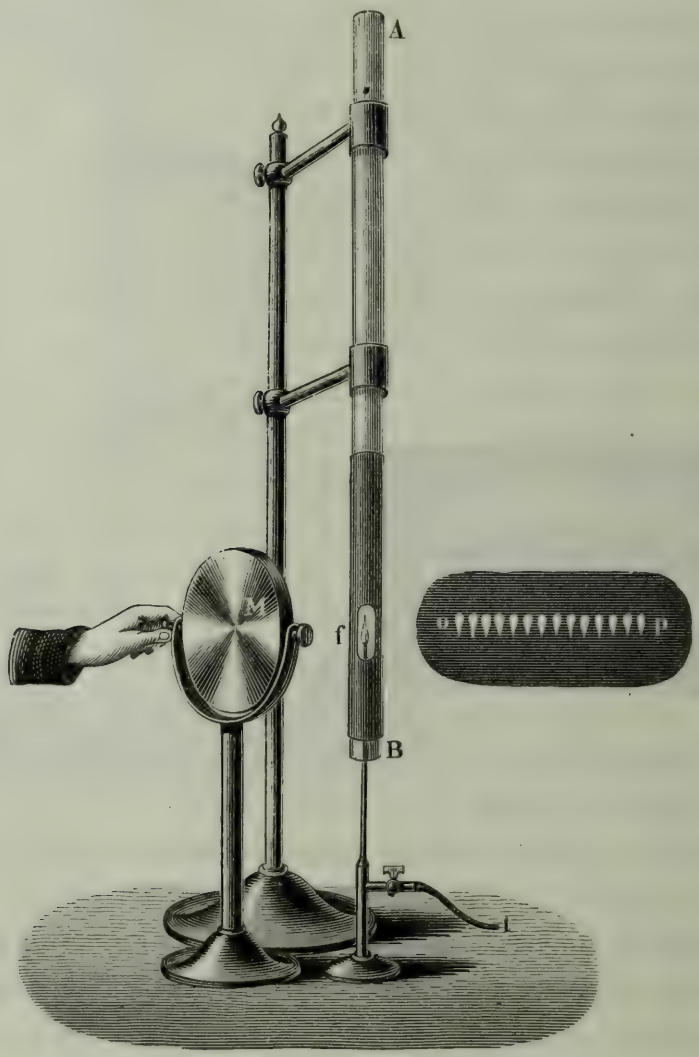


[1]) Dieser Versuch wurde zuerst von Wheatstone mit einer Wasserstoffflamme gemacht.

§. 3. Das Zerlegen singender Flammen.

Bei einer grösseren, helleren und weniger schnell vibrirenden Flamme können Sie Alle dieses Intermittiren

Fig. 122.



wahrnehmen. Ueber dieser Gasflamme *f* (Fig. 122) steht eine Glasröhre *AB*, die 1,80 m lang ist und 5 cm Durchmesser hat. Ein Theil der Röhre ist geschwärzt, so dass

das Licht der Flamme nicht direct auf den Schirm fallen kann, der so dunkel wie möglich sein muss. Der Röhre gegenüber steht ein Hohlspiegel *M*, der ein vergrössertes Bild der Flamme auf den Schirm wirft. Ich drehe den Spiegel mit der Hand und lasse das Bild über den Schirm hinziehen. Wäre die Flamme still und ruhig, so würden wir einen continuirlichen Lichtstreifen erhalten; aber sie zittert und sendet gleichzeitig einen tiefen, starken Ton aus. Wenn der Spiegel rotirt, erhalten wir daher statt eines ununterbrochenen Streifens eine Reihe von Bildern *op*, die eine leuchtende Kette bilden. Drehe ich schneller, so trenne ich diese Bilder weiter von einander; drehe ich langsam, so drängen sie sich zusammen, und in dieser Weise kann die Flammenkette die zierlichsten Abwechslungen darbieten. Wenn ich das untere Ende *B* der Röhre mit der Hand schliesse, so halte ich die Luft derart auf, dass die Flamme sogleich aufhört zu schwingen und ein continuirlicher Streifen entsteht. Beachten Sie, wie der Streifen in dem Moment, wo ich meine Hand wegnehme und der Luftstrom wieder an der Flamme vorbei kann, plötzlich in die gewellte Linie von Bildern zerfällt.

Rijke's tönende Flamme.

Rijke bedient sich eines sinnreichen, bisher unbekannten Verfahrens, um eine Luftsäule in Tonschwingungen zu versetzen. Er setzt quer in eine Röhre eine Scheidewand aus Drahtgaze, die er mittelst einer Flamme oder eines galvanischen Stromes zum Glühen bringt. Im ersten Falle hört der Ton bald auf, auch wenn er anfangs stark war. Im zweiten Falle hält der Ton an, weil die Gaze dauernd erwärmt wird. Die Röhre kann aus Glas

oder Metall bestehen und verschieden gross sein. Ist sie sehr gross und wird die Gaze stark erwärmt, so entstehen sehr laute Töne.

Rijke stellte fest, dass die Wirkung ihr Maximum erreicht, wenn die Gaze am untersten Viertel der Röhrenlänge eingesetzt wird. Eine Bunsen'sche Flamme bringt die Gaze rasch zum Glühen. Die Flamme wird entfernt und sofort entsteht ein Ton, dessen Höhe von der Länge der Röhre und der Temperatur der Luftsäule abhängt. Der Ton nimmt ab, wenn sich die Gaze abkühlt, und hört auf, wenn Gaze und Luft gleiche Temperatur haben. Offenbar rührt die Erscheinung davon her, dass sich die Luft plötzlich ausdehnt, wenn sie durch die erwärmte Gaze hindurchgeht. Die erste Ausdehnung erzeugt einen Stoss, der sich in der offenen Röhre wie gewöhnlich verhält, und der Gaze periodisch die Wärme entzieht. Ein in gewissem Sinne ergänzender Versuch rührt von Bosschia und Reiss her, die musikalische Töne erzeugten, indem sie einen heissen Luftstrom durch kalte Gaze sandten.

§. 4. Schwingungsperiode der Flamme: Toepler's Versuch.

Wenn eine kleine schwingende Leuchtgasflamme mit dem rotirenden Spiegel sorgfältig untersucht wird, so zerfällt die punktirte Linie in eine Reihe von Flammenbildern, bestehend aus gelben Spitzen über tiefblauer Basis. In einigen Fällen war es mir nicht möglich, irgend einen Zusammenhang zwischen den Flammen zu entdecken, denn die Stellen dazwischen waren für das Auge absolut dunkel. Demnach muss die Flamme stellenweise ganz verlöscht sein, wobei nur ein genügender

Rest von Hitze blieb, um das Gas wieder anzuzünden. Dies halte ich für möglich, denn Gas kann durch nicht leuchtende Luft entzündet werden [1]). Mittelst der Sirene können wir bestimmen, wie viele Male diese Flamme in der Secunde erlischt und sich wieder entzündet. Indem der Ton des Instrumentes sich dem der Flamme nähert, gehen dem Einklang wieder jene wohlbekannten „Schläge" voraus, die allmählich langsamer werden, worauf nun die zwei Töne in vollkommenem Einklange verschmelzen. Erhalte ich die Sirene eine Minute lang auf dieser Höhe, so finde ich nach Verlauf dieser Zeit auf unserem Zifferblatt 1700 Umdrehungen angezeigt. Da aber die Scheibe 16 Löcher hat, so folgt, dass jede Umdrehung 16 Wellen entspricht. Multipliciren wir 1700 mit 16, so erhalten wir als Zahl der Wellen in einer Minute 27200. So viele Male verlöschte und entzündete sich also unsere kleine Flamme während der Dauer des Versuchs, das heisst, sie verlöschte und entzündete sich 453 mal in der Secunde.

Ein Lichtblitz hinterlässt trotz seiner kurzen Dauer einen Eindruck auf der Netzhaut, der $^1/_{10}$ Secunde oder länger anhält. Eine abgeschossene Flintenkugel, die von einem einzelnen Blitz beleuchtet wird, scheint während $^1/_{10}$ Secunde in der Luft still zu stehen. Wenn eine schwarze Scheibe mit radialen weissen Streifen bei mässiger Beleuchtung rasch rotirt, verschmilzt das Schwarz und Weiss zu Grau; dagegen bringt ein elektrischer Funken oder Blitz die Scheibe anscheinend zum Stillstande und lässt die weissen Streifen deutlich hervor-

---

[1]) Ein Gasbrenner kann zum Beispiel 12,5 cm über der Spitze einer sichtbaren Gasflamme entzündet werden, wo Platinablättchen nicht mehr glühen.

treten. Nun ist die singende Flamme eine blitzende Flamme und Herr Toepler hat nachgewiesen, dass, wenn eine gestreifte Scheibe vor einer solchen Flamme mit passender Geschwindigkeit rotirt, die Scheibe anscheinend still steht und die weissen Streifen deutlich hervortreten. Der Versuch ist leicht ausführbar und interessant.

§. 5. Harmonische Töne einer Flamme.

Eine singende Flamme giebt den Wellen, welche auf sie eindringen, so leicht nach, dass sie fast ganz von der umgebenden Röhre beherrscht wird; fast ganz, aber nicht vollständig. Die Höhe des Tones hängt in gewissem Grade von der Grösse der Flamme ab. Das zeigt sich leicht, wenn man zwei Flammen denselben Ton geben lässt und dann vorsichtig die eine kleiner oder grösser macht; der Einklang wird dann augenblicklich durch Schläge unterbrochen. So können wir auch, indem wir die Grösse der Flamme verändern, die harmonischen Obertöne der Röhre, in der sie brennt, hervorlocken. Dieser Versuch lässt sich am besten mit Wasserstoff ausführen, weil dessen Verbrennung weit energischer ist, als die gewöhnlichen Gases. Wenn eine 2 m lange Glasröhre über eine grosse Wasserstoffflamme gesteckt wird, so erhält man den Grundton der Röhre, entsprechend einer Theilung ihrer Luftsäule durch einen einzigen Knoten in der Mitte. Bringe ich eine zweite 1 m lange Röhre über dieselbe Flamme, so hört man gar keinen musikalischen Ton, denn die grosse Flamme ist nicht im Stande, sich dem Schwingungstempo der kürzeren Röhre anzupassen. Mache ich aber die Flamme kleiner, so bricht sie bald in lauten Gesang aus, und ihr Ton ist die Octave des Tones, den die längere Röhre

gab. Nun nehme ich die kürzere Röhre fort, und setze noch ein Mal die längere Röhre auf die Flamme. Sie giebt jetzt nicht mehr ihren Grundton, sondern genau denselben Ton wie die kürzere. Um sich dem Schwingungstempo der kleineren Flamme anzupassen, theilt sich die längere Luftsäule nach Art der offenen Orgelpfeifen, wenn sie ihren ersten Oberton geben. Indem man die Grösse der Flamme verändert, kann man also mit dieser Röhre eine Reihe von Tönen erzeugen, deren Schwingungszahlen in dem Verhältniss der ganzen Zahlen 1 : 2 : 3 : 4 : 5 stehen, das heisst den Grundton und die vier ersten Obertöne.

Diese singenden Flammen sind längst bekannt, wenn sie auch wahrscheinlich noch niemals in gleicher Stärke wie heute gezeigt worden sind. Schon 1777 hörte Higgins die Töne einer Wasserstoffflamme. 1802 wurden sie in gewisser Ausdehnung von Chladni untersucht, der auch auf eine unrichtige Erklärung derselben durch De Luc hinweist. Chladni zeigte, dass die Töne von der offenen Röhre, welche die Flamme umgiebt, herrühren, und es gelang ihm auch, die beiden ersten Obertöne zu erhalten. 1802 machte G. de la Rive Versuche über diesen Gegenstand. Er goss etwas Wasser in die Kugel eines Thermometers, erhitzte es und zeigte, dass laute und weiche musikalische Töne durch die tactmässige Verdichtung des Dampfes im Stiele des Thermometers erzeugt werden konnten. Demnach schrieb er die Töne der Flammen der wechselweise eintretenden Ausdehnung und Verdichtung der Wasserdämpfe zu, die durch die Verbrennung erzeugt werden. Wir können seinen Versuch leicht nachmachen. Hält man die mit Wasser gefüllte Kugel eines schräg gestellten Thermometers in eine Spiritusflamme, so werden die Töne hörbar, bald nachdem

das Wasser den Siedepunkt erreicht hat. 1818 zeigte jedoch Faraday, dass die Töne auch dann entstehen, wenn die Röhre, welche die Flamme umgiebt, in Luft von über 100° Celsius gebracht wird, wobei eine Verdichtung ausgeschlossen ist, und ferner, dass die Töne auch von Kohlenoxydflammen gegeben werden, bei denen Wasserdämpfe gar nicht vorkommen.

§. 6. Wirkung äusserer Töne auf Flammen. Versuche von Schaffgotsch und Tyndall.

Die nächste neue, akustische Beobachtung über Flammen wurde vom Grafen Schaffgotsch in Berlin gemacht. Er zeigte, dass eine gewöhnliche Gasflamme, über der eine kurze Röhre steckte, bei dem Schall einer starken Fistelstimme anfing, zu zittern, wenn diese den Grundton oder den ersten Oberton der Röhre angab. Wenn der Ton der Röhre besonders hoch war, konnte die Flamme sogar durch die Stimme ausgelöscht werden.

Im Frühling 1857 erfuhr ich von diesem Versuch. Der kurze Bericht über die Beobachtung in Poggendorff's Annalen enthielt keine Anleitung zu seiner Ausführung; aber indem ich die Bedingungen zu seinem Gelingen aufzufinden suchte, wurde meine Aufmerksamkeit auf eine Menge sonderbarer Erscheinungen gelenkt. Unterdessen verfolgte auch Graf Schaffgotsch seinen Gegenstand weiter. Eine grosse Strecke wanderten wir auf demselben Boden, ohne von einander zu wissen; so weit aber die dabei ausgeführten Versuche uns beiden gemeinschaftlich waren, gebührt Graf Schaffgotsch die Priorität.

Lassen Sie mich hier seine erste Beobachtung

wiederholen. In einer 48 cm langen Röhre brennt still und hell eine kleine Gasflamme. Ich habe durch Versuche den Ton dieser Röhre gefunden und gebe ihn nun in einiger Entfernung von der Flamme an; sie zittert. Um sie auszulöschen, muss man einen Brenner mit sehr enger Oeffnung anwenden, aus welchem das Gas unter bedeutendem Druck ausströmt. Singe ich leise den Ton der Röhre, in der eine solche Flamme brennt, so zittert die Flamme. Verstärke ich aber die Stimme, so erlischt sie.

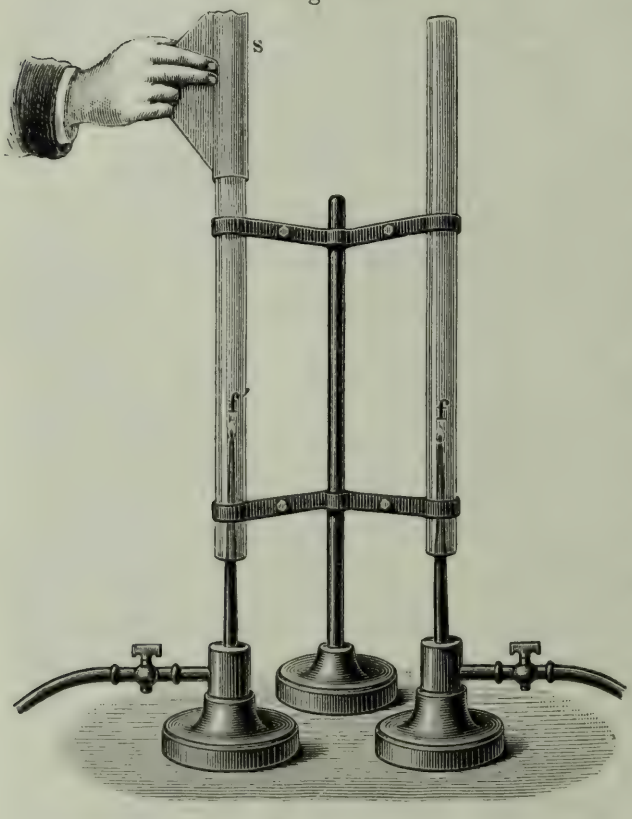
Die Ursache des Zitterns der Flamme wird am besten durch einen Versuch mit der Sirene offenbart. Wenn der Ton dem der Flamme nahe kommt, hören Sie Schläge und sehen zugleich, wie die Flamme im Tact mit den Schlägen tanzt. Die Sprünge folgen sich langsamer, je mehr man sich dem Einklange nähert. Sie hören auf, wenn er erreicht ist, fangen wieder an, sobald die Sirene über den Einklang hinausgeht und werden schneller, je grösser die Disharmonie wird. Dieser Versuch erklärte mir das vom Grafen Schaffgotsch beobachtete Zittern der Flamme. Sie hüpfte, weil der Ton der umgebenden Röhre beinahe, aber nicht ganz, im Einklange mit der Stimme des Beobachters war.

Dass das Hüpfen der Flamme in genauer Uebereinstimmung mit den Schlägen vor sich geht, zeigt eine Stimmgabel, die denselben Ton giebt wie die Flamme. Wenn man eine solche Gabel mit etwas Wachs beschwert, so dass ihr Einklang mit der Röhre gestört ist, und sie in der Nähe der Röhre, in der die Flamme singt, anschlägt, so treffen die Schläge des Tones und die Sprünge der Flamme zusammen. Wenn die Gabel dann über ein Resonanzgefäss gehalten wird, so können Sie die Schläge hören und zu gleicher Zeit das

Tanzen der Flamme sehen. Man kann das Tempo, in welchem die Schläge einander folgen, verändern, indem man die kleine Belastung der Stimmgabel oder die Grösse der Flamme verändert; aber stets sieht man die Sprünge in demselben Moment, in dem man die Schläge hört.

Bei der Ausführung dieser Versuche bemerkte ich, als ich meine Stimme zu einer bestimmten Höhe erhob, dass eine bis dahin stumme Flamme zu singen begann. Ohne mein Wissen war dieselbe Beobachtung kurze Zeit vorher von dem Grafen Schaffgotsch gemacht worden. Eine 30 cm lange Röhre wird über die Flamme gebracht, so dass diese etwa 4 cm vom unteren Ende der Röhre entfernt darin brennt. Wenn der passende Ton angegeben wird, zittert die Flamme, singt aber nicht. Rücke ich die Röhre herunter, bis die Flamme 7 cm vom unteren Ende absteht, so beginnt sie von selbst zu singen. Zwischen diesen beiden Stellungen giebt es noch eine dritte, bei welcher die Flamme ruhig brennt, aber zu singen anfängt und weitersingt, wenn sie von der Stimme erregt wird.

Fig. 123.



Wenn man eine ruhige Flamme, die in der eben beschriebenen Weise erregbar ist, in einem rotirenden Spiegel betrachtet, so erscheint sie als ununterbrochener Lichtstreifen. Nichts kann schöner sein, als wenn sich dieses Band plötzlich in eine Kette prächtig leuchtender Perlen auflöst, sobald die Stimme die Höhe des passenden Tones erreicht.

Eine Flamme kann durch eine andere zum Singen gebracht werden. Sie sehen vor sich zwei kleine Flammen f und f', Fig. 123. Die Röhre über f' ist 28 cm, die über f 30 cm lang. Auf der kürzeren Röhre sitzt ein Papierschieber s. Die Flamme f' singt jetzt, aber die Flamme f in der längeren Röhre schweigt. Ich rücke den Papierschieber an f' hinauf, so dass die Röhre länger wird. Sobald ich der Höhe der Röhre von f nahe genug komme, singt diese Flamme. Der Versuch kann so verändert werden, dass man anfangs f die singende und f' die schweigende Flamme sein lässt. Rückt man den Schieber hinauf, so wird bald ein Punkt erreicht, wo die Flamme f' ihren Gesang beginnt. Auf diese Weise kann eine Flamme die andere aus bedeutender Entfernung erregen. Ebenso kann man auch die singende Flamme durch passende Anwendung der Stimme zum Schweigen bringen.

Freie schallempfindliche Flammen.

§. 7. Die Entdeckung empfindlicher Flammen durch Leconte.

Wir haben uns bisher mit Flammen beschäftigt, die von Resonanzröhren umgeben waren; in freiem Zustande

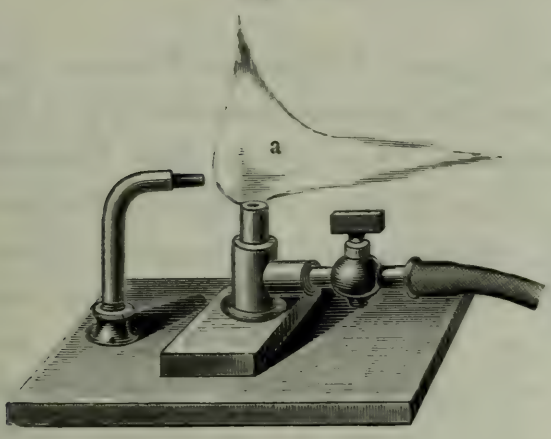
hätte keine von diesen Flammen irgendwie auf Geräusche oder Töne geantwortet, wie wir sie hier anwenden konnten. Doch kann man auch freie Flammen schallempfindlich machen. Diese Wirkung musikalischer Töne auf freie Flammen wurde zuerst in Amerika bei einer musikalischen Soirée durch Leconte bemerkt. Er beschreibt seine Beobachtung in folgender Weise: „Kurz nachdem die Musik angefangen hatte, bemerkte ich, dass die Flamme Schwingungen zeigte, die mit den hörbaren Schwebungen der Musik vollkommen übereinstimmten. Diese Erscheinung musste Jedem auffallen, namentlich wenn die starken Töne des Cello hinzutraten. Es war ausserordentlich interessant zu beobachten, wie vollständig genau sogar die Triller dieses Instrumentes von der Flamme wiedergegeben wurden. Für einen Tauben wäre die Harmonie sichtbar geworden. Im Laufe des Abends, als der Gasverbrauch in der Stadt abnahm und dadurch der Druck gesteigert wurde, ward die Erscheinung deutlicher. Das Hüpfen der Flamme steigerte sich allmählich, wurde etwas unregelmässig und ging endlich in ein anhaltendes Flackern über, wobei der charakteristische Ton gehört wurde, der anzeigt, dass mehr Gas ausströmt, als verbrannt werden kann. Ich stellte dann durch einen Versuch fest, dass die Erscheinung nur dann eintrat, wenn das Ausströmen des Gases so geregelt war, dass die Flamme dem Flackern nahe kam. Ich überzeugte mich ferner durch einen Versuch, dass die Wirkungen sich nicht zeigten, wenn man den Boden und die Wände des Zimmers durch wiederholte Stösse erschütterte. Daraus geht hervor, dass die Schwankungen der Flamme nicht von indirecten Schwingungen herrührten, die durch das Medium der Wände dem Brenner mitgetheilt sein mochten, sondern

dass sie durch den directen Einfluss der Tonwellen der Luft auf die Flamme erzeugt waren" [1]).

Die wichtige Bemerkung, dass das Hüpfen der Flamme erst dann beobachtet wird, wenn sie dem Flackern nahe ist, giebt uns das Mittel, die Versuche von Leconte zu wiederholen. Ausserdem wird eine genauere Kenntniss der Bedingungen ihres Erfolges uns ermöglichen, sie zu verändern und zu verstärken. Vor Ihnen brennt eine helle Kerzenflamme; aber kein Geräusch, welcher Art es auch sei, hat den geringsten Einfluss auf sie. Obgleich sehr mächtige Tonwellen durch die Luft gehen, bleibt die Kerze für den Ton vollkommen unempfindlich.

Aber unter den richtigen Bedingungen kann auch eine gewöhnliche Kerzenflamme schallempfindlich werden. Ich treibe aus diesem kleinen Gebläse einen feinen Luftstrom durch die Kerzenflamme, worauf sie zu flackern beginnt. Sobald ich pfeife oder zwitschere, hüpft die Flamme sichtlich. Man kann den Versuch auch so anordnen, dass die Flamme beim Pfeifen ihre ursprüngliche Helle wieder gewinnt, oder dass der Rest von Licht, den sie noch hat, vollends verschwindet.

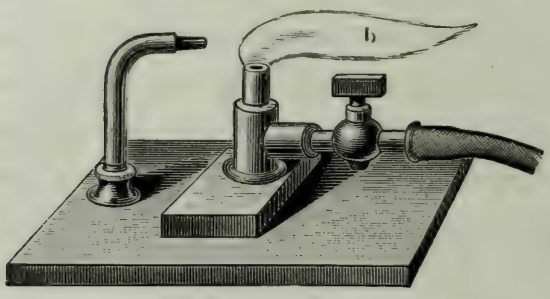
Fig. 124.



[1]) Philosophical Magazine. März 1858, S. 235. Im Anhang ist die interessante Arbeit von Leconte vollständig abgedruckt.

Die Flamme unseres Gebläses wird durch Pfeifen nicht berührt, so lange keine Luft hindurchgetrieben wird. Messe ich die Kraft des Luftstromes richtig ab, so erhalte ich eine Flamme, wie auf Fig. 124 (a. v. S.). Wenn ich pfeife, so legt sich der aufrechtstehende Theil der Flamme nieder und die Flamme behält, so lange der Ton anhält, eine Form wie auf Fig. 125.

Fig. 125.



§. 8. Versuche mit Fischschwanz- und Fledermausbrennern.

Sie sehen hier eine dünne blattförmige Flamme, die von einem gewöhnlichen Fischschwanzbrenner (Fig. 126) ausgeht. Die verschiedensten Töne bringen diese Flamme nicht zum Zittern. Pfeifen, Stimmgabeln, Glocken und Trompeten haben ebenso wenig Erfolg. Eine kaum bemerkbare Bewegung im Inneren der Flamme zeigt sich, wenn eine schrille Pfeife dicht neben ihr angeblasen wird. Drehe ich den Hahn weiter auf, so kommt die Flamme an die Grenze des Flackerns. Wenn jetzt die Pfeife ertönt, so schickt sie plötzlich sieben flackernde Zungen aus (Fig. 127). Sobald der Ton aufhört, verschwinden diese und die Flamme wird ruhig.

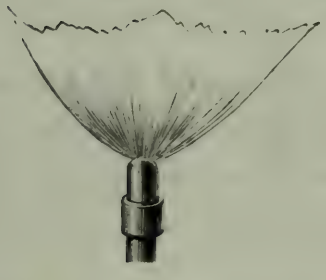
Fig. 126.

Nehmen wir einen Fledermausbrenner statt eines Fischschwanzbrenners, so bekommen wir eine breite, ruhige Flamme (Fig. 128), die für den stärksten Ton, der hier angewendet werden könnte, völlig unempfindlich ist. Die Flamme wird aus diesem kleinen Gasreservoir [1]) gespeist. Verstärke ich allmählich den Druck, so erfolgt beim Pfeifen ein leichtes Flackern des Randes. Wenn ich das Gas so weit aufdrehe, dass die Flamme dem Brausen nahe ist, und nun pfeife,

Fig. 127.

Fig. 129.

Fig. 128.



so braust sie und nimmt plötzlich die Form wie auf Fig. 129 an.

Schlage ich in einiger Entfernung mit einem Hammer auf einen Amboss, so schickt die Flamme sofort ihre Zungen aus.

---

[1]) Ein passend belasteter Gasbeutel lässt sich auch für diese Versuche benutzen.

Eine wichtige Bedingung für den Erfolg dieser Versuche zeigte sich auf folgende Weise: Ich beobachtete zwei Fischschwanzflammen, deren eine beim Pfeifen hüpfte, während die andere ruhig blieb. Der Hahn der unempfindlichen Flamme wurde zugedreht und dadurch grösserer Druck auf die andere Flamme ausgeübt. Sie flackerte und wurde deshalb herabgeschraubt. Nun aber zeigte sie sich unempfindlich, wie nahe man sie auch dem Stadium des Flackerns bringen mochte; die enge Oeffnung des halb zugedrehten Hahnes störte die Einwirkung des Schalls. Wurde der Hahn ganz aufgedreht und die Flamme nur dadurch verkleinert, dass man den Hahn des anderen Brenners öffnete, so wurde sie wieder empfindlich. Bis dahin hatte man eine grosse Zahl von Brennern erprobt, und bei sehr vielen die Wirkung gleich Null gefunden. Als man jedoch dem Fingerzeig, den diese Beobachtung gab, folgte und die Brenner, welche die Flammen speisten, weit öffnete, wurden auch die widerspenstigsten Brenner dadurch empfindlich gemacht.

Leconte's Beobachtung ist Ihnen auf diese Weise bequem und deutlich veranschaulicht. Bei unseren nächstfolgenden, viel feineren Versuchen ist die Anwendung der eben erwähnten Maassregel noch wichtiger.

§. 9. Versuche mit Flammen aus runden Oeffnungen.

Je nach Umständen kann durch Tonschwingungen eine lange Flamme verkürzt und eine kurze Flamme verlängert werden. Die Flamme auf Fig. 130 ist lang, gerade und qualmig; die auf Fig. 131 kurz, zackig und hell. Beim Pfeifen wird die lange Flamme kurz, zackig

und hell, wie auf Fig. 132; die gezackte Flamme dagegen wird lang und qualmig, wie Fig. 133. In Bezug auf ihr Verhalten beim Pfeifen ist daher die eine Flamme das Widerspiel der anderen.

Fig. 134 zeigt eine andere qualmige Flamme, die beim Pfeifen die Form von Fig. 135 annimmt.

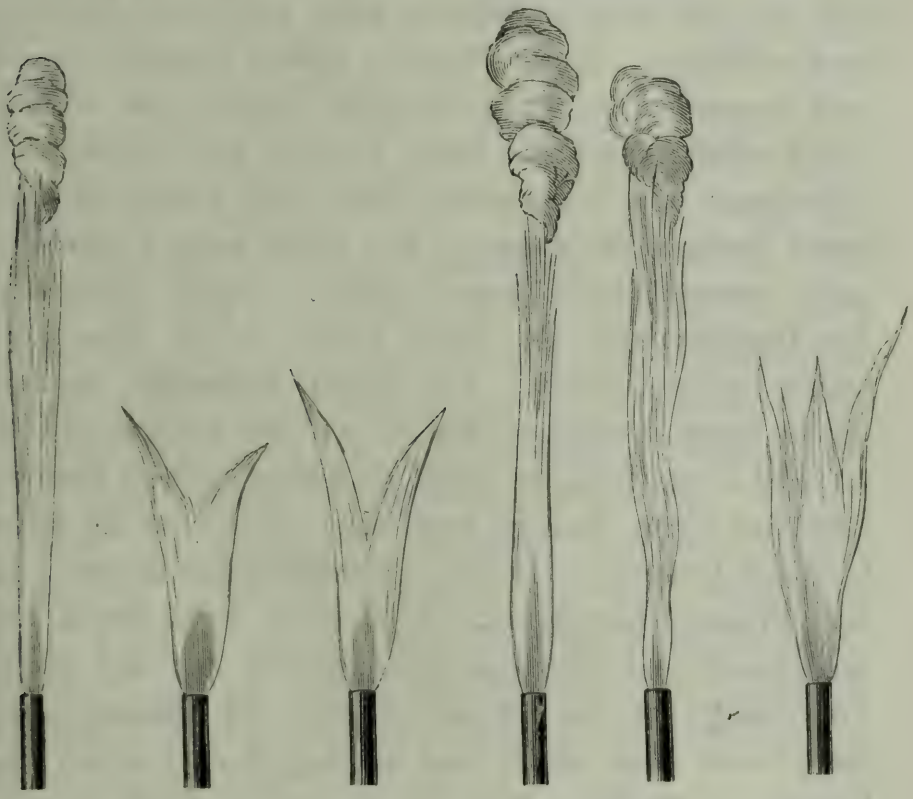


Fig. 130. Fig. 131. Fig. 132. Fig. 133. Fig. 134. Fig. 135.

Wenn eine helle empfindliche Flamme in einem dunkeln Zimmer brennt, in dem man eine passende Glocke anschlägt, so wird das Licht durch den Schall periodisch ausgelöscht. Jeder Glockenschlag ist von einer Verdunkelung des Zimmers begleitet.

Die vorhergehenden Versuche zeigen, dass Flammen durch Tonschwingungen verlängert und verkürzt werden. Sie können auch in Drehung versetzt werden. Aus

einigen unserer selbstgefertigten Brenner steigen flache Flammen auf, die alle ungefähr 25 cm hoch sind, und deren grösste Breite 7,5 cm beträgt. Beim Pfeifen dreht sich die Fläche der Flamme um 90 Grad und bleibt in ihrer neuen Stellung, so lange der Ton anhält.

Sie sehen hier eine sehr ruhige, helle Flamme vor sich, die der runden Oeffnung eines gewöhnlichen Brenners entströmt. Dieser Brenner, dessen Flamme nur bei sehr grossem Druck ins Flackern kommt, ist absichtlich gewählt, damit Sie recht deutlich den allmählichen Uebergang von Unempfindlichkeit zur Empfindlichkeit daran beobachten können. Die 10 cm hohe Flamme ist ganz unempfindlich gegen Schall. Durch Steigerung des Druckes wird sie 15 cm hoch; sie ist aber noch immer unempfindlich. Bei 30 cm antwortet sie mit einem kaum merkbaren Zittern auf das Pfeifen. Ist sie 40 oder 42 cm hoch, so hüpft sie lebhaft, sobald gepfiffen oder auf einen Amboss geschlagen wird. Ist sie 50 cm hoch, so bemerken Sie ein intermittirendes Zittern, das dem Brausen vorausgeht. Noch etwas mehr Druck und sie braust und verkürzt sich zugleich bis auf 20 cm. Vermindere ich den Druck, so wird die Flamme abermals 50 cm hoch, steht aber im Begriff zu brausen und kürzer zu werden. Wie die singenden Flammen, die von der Stimme den Anstoss erhielten, steht sie am Rande eines Abgrundes, und der richtige Ton stösst sie hinab. Sie verkürzt sich beim Pfeifen, gerade wie sie es that, als der Druck zu stark wurde. Diese Wirkung erinnert an die Geschichte von den Schweizer Maulthiertreibern, von denen man sagt, dass sie an gewissen Stellen ihre Glocken umwickeln, damit das Geläute nicht eine Lawine auslöse. Der Schnee müsste sich genau in der Gleichgewichtslage befinden, damit dies geschehen

könnte. Wahrscheinlich geschieht es nie; aber unsere Flamme erläutert jedenfalls die Theorie eines solchen Vorganges. Wir bringen sie bis an die Grenze des Fallens, und die Tonwellen beschleunigen das, was schon bevorstand.

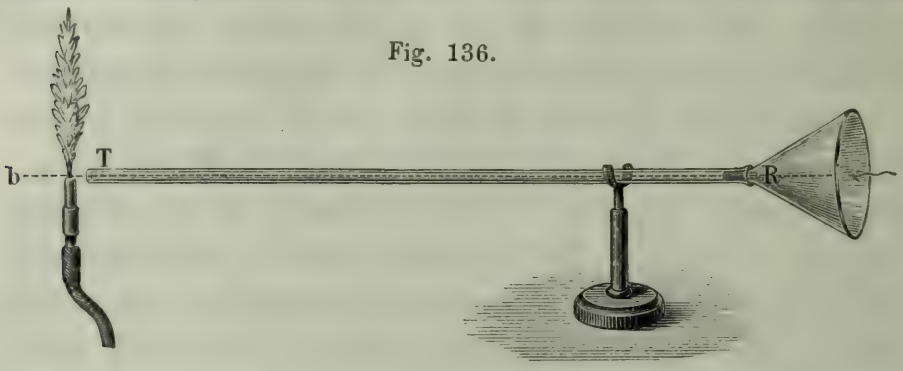
Wenn die Flamme flackert, so ist das Gas in der Oeffnung des Brenners in Schwingung gerathen; umgekehrt, wenn das Gas in der Oeffnung in Schwingung geräth, so flackert die Flamme, wenn sie dem Stadium des Flackerns vorher nahe genug gestanden hat. Also wirken die Tonschwingungen, wenn sie das Gas beim Ausströmen aus dem Brenner treffen, ebenso wie eine Steigerung des Druckes im Gasbehälter. Wir haben uns hier in der That die physikalische Ursache des Flackerns bei zu starkem Druck klar gemacht, das, so gewöhnlich es ist, doch meines Wissens noch nie erklärt wurde. Das Gas erleidet in der Brenneröffnung Reibung, die den Strom, wenn er genügend stark ist, in den Zustand der Schwingung versetzt, der das Flackern verursacht. Weil das Flackern auf diese Weise entsteht, kann ein verschwindend kleines Maass von Kraft in der Form von richtig abgemessenen Schwingungen die gleiche Wirkung hervorbringen wie eine bedeutende Steigerung des Druckes.

§. 10. Sitz der Empfindlichkeit.

Dass die äusseren Schwingungen auf das Gas an der Brenneröffnung und nicht, wie einige Autoren annehmen, auf den Brenner selbst, auf die mit ihm verbundene Röhre oder auf die Flamme oberhalb des Brenners einwirken, wird durch folgenden Versuch bewiesen. Ein Glastrichter R (Fig. 136 a. f. S.) wird mit einer 90 cm langen und 1,2 cm breiten Röhre verbunden. Vor das offene Ende T der Röhre stellt man eine empfind-

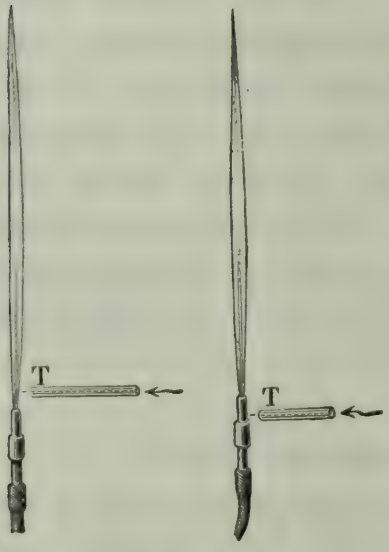
liche Flamme b, in den Trichter bringt man bei R eine kleine hochgestimmte Zunge. Trifft der Ton die Wurzel

Fig. 136.



der Flamme, wie auf Fig. 136, so ist die Wirkung heftig; trifft er einen Punkt 1,2 cm oberhalb des Brenners, wie bei Fig. 137, oder ebenso viel unterhalb des Brenners, wie bei Fig. 138, so bleibt die Wirkung aus. Man kann den Versuch auch ohne Röhre nur mit dem Trichter ausführen, wenn der Schall so abgefangen wird, dass er nur durch den Stiel des Trichters die Flamme trifft [1]).

Fig. 137. Fig. 138.



§. 11. Einfluss der Tonhöhe.

Nicht alle Töne haben den gleichen Einfluss auf die Flamme; es gehören Wellen von besonderer Periode dazu, um die grösste Wirkung auszuüben. Wirksam

[1]) Bei dem Versuch mit dem Gebläse und der Kerzenflamme kamen die geschilderten Wirkungen dadurch zu Stande, dass die äusseren Schwingungen auf den Luftstrahl einwirkten, der dem Gebläse entströmte, nicht aber auf die Flamme selbst.

sind die Wellen, die sich im Tact mit den Schwingungen befinden, welche das Gas selbst durch Reibung gegen die Ränder der Oeffnung hervorbringt. Bei Flammen mit geringerem Druck wirkt leises, tiefes Pfeifen stärker als ein schriller Ton. Bei Flammen mit starkem Druck müssen die erregenden Schwingungen sehr schnell, der Ton mithin hoch und schrill sein. Von vier Stimmgabeln, die 256, 320, 384 und 512 Schwingungen in der Secunde machen, bringt keine einzige die geringste Wirkung auf unsere Flamme hervor. Diese Gabeln können aber ausser ihren Grundtönen eine Reihe von sehr hohen Obertönen geben. Die Schwingungen dieser Serie betragen 1600, 2000, 2400 und 3200 in der Secunde. Bei jedem dieser Töne hüpft die Flamme; am schnellsten und lebendigsten antwortet sie dem höchsten Ton.

Schlägt man mit einem Hammer auf ein Brett, so antwortet die Flamme; schlägt man aber mit demselben Hammer auf einen Amboss, so erfolgt die Antwort viel lebhafter und entschiedener. Dies geschieht, weil der Klang des Ambosses mehr von den höheren Tönen enthält, für welche die Flamme empfindlich ist. Der starke Ton, den unsere umgekehrte Glocke giebt, wenn sie von ihrer Resonanzröhre verstärkt wird, hat keinen Einfluss auf die Flamme. Bringe ich jedoch ein kleines Geldstück in Berührung mit der schwingenden Fläche, so verkürzt sich die Flamme sofort, flackert und braust. Mein Assistent trägt eine kleine mit Uhrwerk versehene Glocke an das entferntere Ende der Gallerie und lässt sie dort schlagen. Die Schläge folgen sich rhythmisch, und die Flamme fällt mit jedem Schlage brausend von 50 cm auf 20 cm.

Die Geschwindigkeit, mit der sich der Schall durch die Luft fortpflanzt, wird durch diese Versuche gut ge-

zeigt; denn zwischen dem Schlag der Glocke und dem Zucken der Flamme ist kein merklicher Zeitunterschied.

Wenn der Ton, der die Flamme beeinflusst, von sehr kurzer Dauer ist, so entsteht eine eigenthümliche und lehrreiche Wirkung. Die Seiten der Flamme erscheinen plötzlich von ihrer Mitte an abwärts ausgefranst und mit leuchtenden Zungen besetzt, während der mittlere Flammenstrahl weder seine Höhe noch seine Dicke verändert. Die Flamme ist im Normalzustande auf Fig. 139 und mit den Fransen auf Fig. 140 dargestellt. Die Wirkung ist der Nachdauer des Eindruckes auf der Netzhaut des Auges zuzuschreiben. Die Flamme fällt thatsächlich bis zu den Fransen, steht aber so schnell wieder auf, dass das Auge gar keine Verkürzung bemerkt [1]).

Fig. 139. Fig. 140.

§. 12. Die Vocalflamme.

Die wunderbarste aller bis jetzt entdeckten Flammen steht nun vor Ihnen. Sie brennt aus der einzigen Oeffnung eines Steatitbrenners und hat eine Höhe von 60 cm. Beim leisesten Schlag auf einen entfernten Amboss fällt sie auf 17,5 cm. Wenn ich einen Schlüsselbund

[1]) Diese Versuche lassen sich auf mannigfache Weise verändern. Man kann dabei ausser dem Leuchtgas auch andere brennbare Gase anwenden. Auch mit Gasmischungen werden schöne und auffallende Resultate erzielt. Es wurde dabei gefunden, dass verschwindend kleine mechanische Verunreinigungen den grössten Einfluss ausüben.

schüttele, wird die Flamme heftig bewegt und braust. Lässt man aus einer Höhe von 18 m ein Geldstück auf das andere fallen, so wird die Flamme niedergeschlagen. Ich kann nicht durch das Zimmer gehen, ohne sie zu bewegen; das Knarren meiner Stiefel bringt sie in heftige Unruhe, ebenso das Knittern oder Zerreissen eines Papierstücks oder das Rauschen eines seidenen Kleides. Sogar ein niederfallender Regentropfen erschüttert sie. Ich halte eine Uhr an die Flamme; Sie hören ihr Ticken nicht, aber Sie sehen seine Wirkung. Bei jedem Ticken fällt und braust die Flamme. Auch das Aufziehen der Uhr versetzt sie in Unruhe. Das entfernte Gezwitscher eines Sperlings und das Zirpen eines Heimchens schlägt sie nieder. Ich werde einige Strophen von Spenser sprechen:

Her ivory forehead full of bounty brave,
Like a broad table did itself dispread;
For love his lofty triumphs to engrave,
And write the battles of his great godhead.
All truth and goodness might therein be read,
For there their dwelling was, and when she spake,
Sweet words, like dropping honey she did shed;
And through the pearls and rubies softly brake
A silver sound, which heavenly music seemed to make[1]).

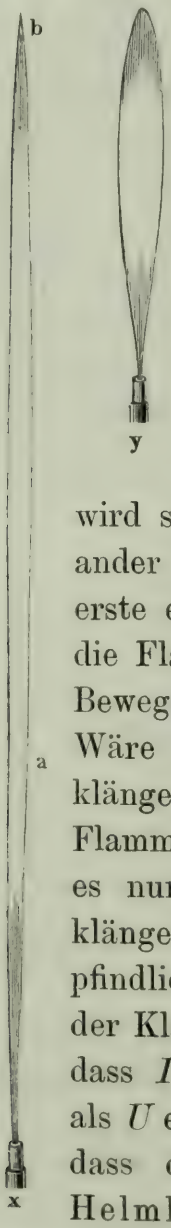
Die Flamme sucht aus meinen Worten einzelne Töne heraus. Manche hebt sie nur durch ein leichtes Nicken hervor, bei anderen verneigt sie sich entschiedener und für einige macht sie das allertiefste Compliment, während sie für viele ein vollkommen taubes Ohr hat.

Auf Fig. 141 (a. f. S.) sieht man diese wunderbare Flamme. Wenn ich in einiger Entfernung davon zische

[1]) Da solche Strophen gewählt sind, in denen die auf die Flamme einwirkenden Consonanten und Vocale besonders oft vorkommen, konnten sie nicht übersetzt werden. Anmerkung des Uebersetzers.

oder einen Schlüsselbund schüttele, fällt sie zu der Form von Fig. 142 zusammen, indem die ganze Länge von a bis b plötzlich verschwindet. Auch wird das Licht zugleich so gut wie ausgelöscht, so dass nur ein bleicher, fast nicht leuchtender Rest bleibt. Die Abbildungen sind nach Photographien der Flamme gemacht.

Fig. 141. Fig. 142.



Zur Unterscheidung von anderen Flammen habe ich sie die „Vocalflamme“ genannt, weil die verschiedenen Vocalklänge verschieden auf sie wirken. Ein lautes, volltönendes U hat keine Wirkung auf die Flamme. Bei O zittert sie. Bei I wird sie stark bewegt. Ich spreche hinter einander die Worte „Nute, Note, Niete“. Auf das erste erfolgt keine Antwort, beim zweiten zuckt die Flamme, beim dritten geräth sie in grössere Bewegung, und der Ton A wirkt noch stärker. Wäre uns nicht die Beschaffenheit der Vocalklänge bekannt, so würde dies Verhalten der Flamme ein unlösbares Räthsel sein. So aber ist es nur ein Beweis für die Theorie der Vocalklänge. Die Flamme ist für hohe Töne am empfindlichsten; daraus können wir schliessen, dass der Klang A höhere Töne enthält als der Klang I; dass I höhere Töne als O und O höhere Töne als U enthält [1]). Ich brauche nicht erst zu sagen, dass dies vollkommen mit der Analyse von Helmholtz übereinstimmt.

---

[1]) Anmerkung: Die höchsten Obertöne des I sind wahrscheinlich nicht zur Wirkung gekommen. H. H.

Diese Flamme ist auch ganz besonders empfindlich für den Buchstaben *S*. Ein Gezisch enthält die Elemente, die sie am stärksten berühren. Das Gas strömt mit Gezisch aus dem Brenner, deshalb ist ein von aussen kommender Ton derselben Art besonders wirksam. Ich lasse einen Stoss comprimirter Luft aus einer Metallbüchse entweichen. Sofort duckt sich die Flamme, nicht etwa wegen eines Luftzuges, der von der Büchse zu der Flamme gelangt wäre, denn ich stehe in einer Entfernung, bei der daran gar nicht zu denken ist; sondern vielmehr weil der Ton die Flamme afficirt. Ich schicke Jemand an das entfernteste Ende der Gallerie, wo er die comprimirte Luft in Stössen aus der Büchse entweichen lässt. Bei jedem Stoss fällt die Flamme plötzlich. So bringen die Stösse der aus einer Oeffnung entströmenden Luft die Flamme an der anderen Oeffnung in Aufregung.

Wenn ich eine Spieluhr auf den Tisch stelle und in Gang setze, so benimmt sich die Flamme wie ein empfindendes Wesen, verbeugt sich leicht vor einzelnen Tönen und knixt tief vor anderen.

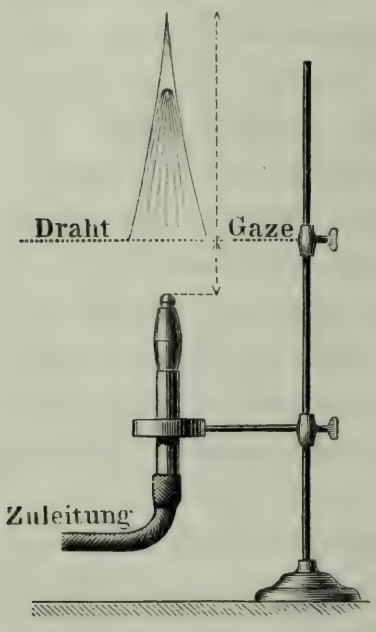
§. 13. Philipp Barry's empfindliche Flamme.

Philipp Barry hat eine neue sehr wirksame Form der empfindlichen Flamme entdeckt, die er in einem an mich gerichteten Briefe folgendermaassen beschreibt: „Es ist die empfindlichste Flamme, die ich kenne, obgleich wegen ihrer geringeren Grösse weniger auffallend als Ihre Vocalflamme. Sie besitzt den Vorzug, dass der gewöhnliche Leitungsdruck vollkommen genügt, um sie hervorzubringen. Man erzeugt sie, indem man gewöhnliches Leuchtgas nicht am Brenner, sondern mehrere

Centimeter darüber entzündet. Zu diesem Zweck bringt man ein Stück Drahtgaze zwischen den Brenner und die Flamme.

Fig. 143 zeigt die Anordnung. Der Abstand zwischen dem Brenner und der Gaze beträgt 5 cm. Die Gaze bildet ein 17,5 cm grosses Quadrat und ruht auf dem Ring eines Retortenständers. Sie hat 12 Löcher auf den Centimeter. Der Brenner ist Sugg's Steatitbrenner, derselbe, der für die Vocalflamme benutzt wurde.

Fig. 143.



Die Flamme ist ein schlanker, ungefähr 10 cm hoher Kegel, die obere Hälfte sendet ein helles gelbes Licht aus, die Basis leuchtet nicht und brennt blau. Bei dem geringsten Geräusch braust die Flamme, fällt bis zur Oberfläche der Gaze und wird unsichtbar. Sie benimmt sich sehr lebhaft und da sie ziemlich geräuschvoll ist, sind ihre Bewegungen dem Ohr ebenso auffallend wie dem Auge.

Auf Vocalklänge reagirt sie nicht mit so feinen Unterschieden wie die Vocalflamme. Gegen *A* ist sie sehr empfindlich, gegen *E* wenig, gegen *I* etwas mehr, gegen *o* ist sie vollständig unempfindlich, gegen *u* schwach empfindlich. Sie tanzt aufs Schönste zu den Tönen einer kleinen Spieldose und ist äusserst empfindlich gegen alle Tonschwingungen, welche die Vocalflamme afficiren.“

§. 14. Lord Rayleigh's empfindliche Flamme.

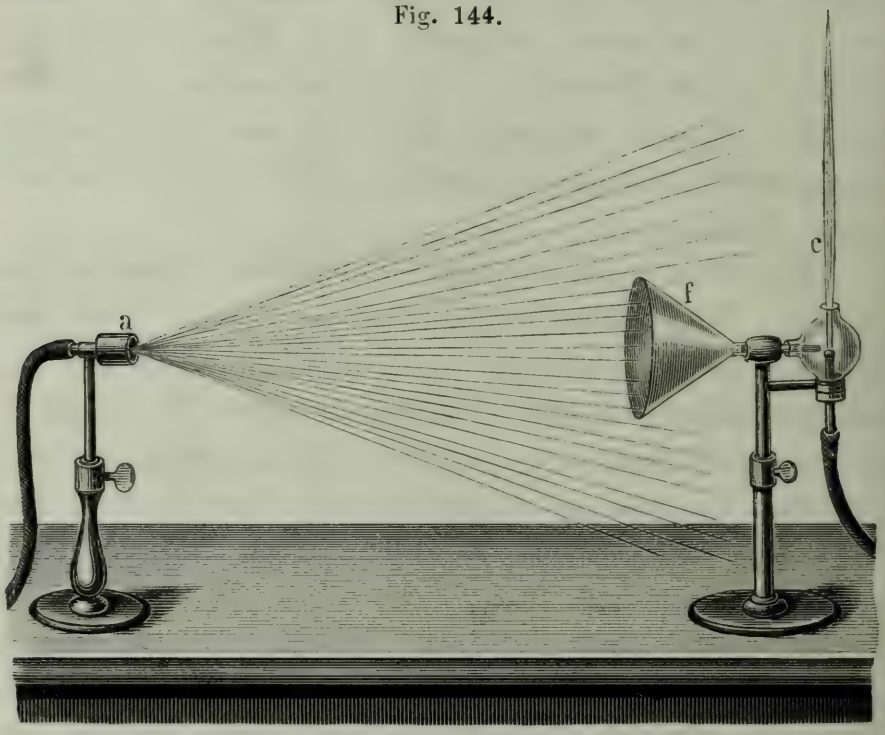
Lord Rayleigh hat kürzlich eine neue Anordnung für empfindliche Flammen ersonnen. Ein Gasstrahl strömt aus einem Lochbrenner senkrecht in einen Hohlraum, der gegen die Luft abgeschlossen ist, geht dann durch eine mehrere Centimeter lange Messingröhre und brennt an der freien Luft. Die Vorderwand des Hohlraumes ist eine biegsame Membran aus Seidenpapier, durch welche äussere Geräusche an den Brenner herantreten können.

Das Princip ist dasselbe wie bei der Flamme von Barry. Bei beiden ist der unentzündete Theil des Strahles der empfindliche und die Flamme ist nur das äussere Zeichen. Barry's Flamme ist zwar sehr empfindlich gegen Schall, wird aber durch den leisesten Luftzug gestört. Vor einigen Jahren machte Herr Ridout den Vorschlag, den Strahl in eine unten luftdicht verschlossene Röhre zu leiten und erst zu entzünden, wenn er das obere Ende erreicht. Hierbei können jedoch äussere Schwingungen nur schwer an den empfindlichen Theil des Strahles herantreten und wenn sie ihn erreichen, sind sie nicht von der richtigen Art, weil ihnen nur eine geringe quer zum Strahl gerichtete Bewegung innewohnt. Die Anordnung von Lord Rayleigh verbindet in befriedigender Weise Empfindlichkeit gegen Schall mit Unempfindlichkeit gegen Luftzug und erfordert keinen stärkeren Druck als den gewöhnlicher Gasleitungen. Soll die äusserste Empfindlichkeit erzielt werden, so muss man den Gasdruck reguliren, bis der Strahl im Begriff ist, zu flackern, ohne zu tönen.

§. 15. Convergirende und divergirende Schalllinsen.

Ehe wir die empfindliche Flamme verlassen, möchte ich Ihnen noch einen lehrreichen Versuch über Schallbrechung vorführen. Dieses Thema ist bereits erörtert worden; aber der Versuch, den ich Ihnen jetzt zeigen

Fig. 144.



will, ist nicht bloss dem Einzelnen zugänglich, sondern allen Anwesenden und umfasst ausser convergirenden auch divergirende Schalllinsen. Stickoxydul — das von Zahnärzten vielfach verwendete sogenannte Lachgas — ist ungefähr ebenso dicht wie Kohlensäure. Aus diesem Gas, das der Kohlensäure durchaus vorzuziehen ist, soll unsere convergirende Schalllinse bestehen. Ich drücke einen Gummibeutel, der das Gas enthält und erzeuge eine Seifenblase. Bei *a* (Fig. 144) wird eine Zunge aufgestellt, die einen hohen Ton giebt. Der Druck ist so

regulirt, dass die Flamme stetig und ruhig brennt, wenn die Zunge tönt. Bringe ich nun die Seifenblase *b*

Fig. 145.

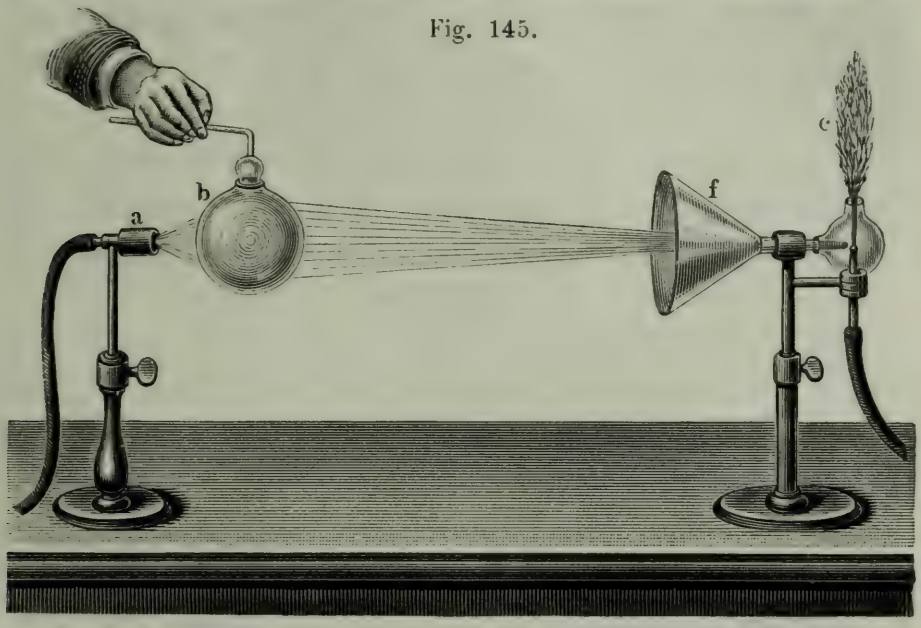
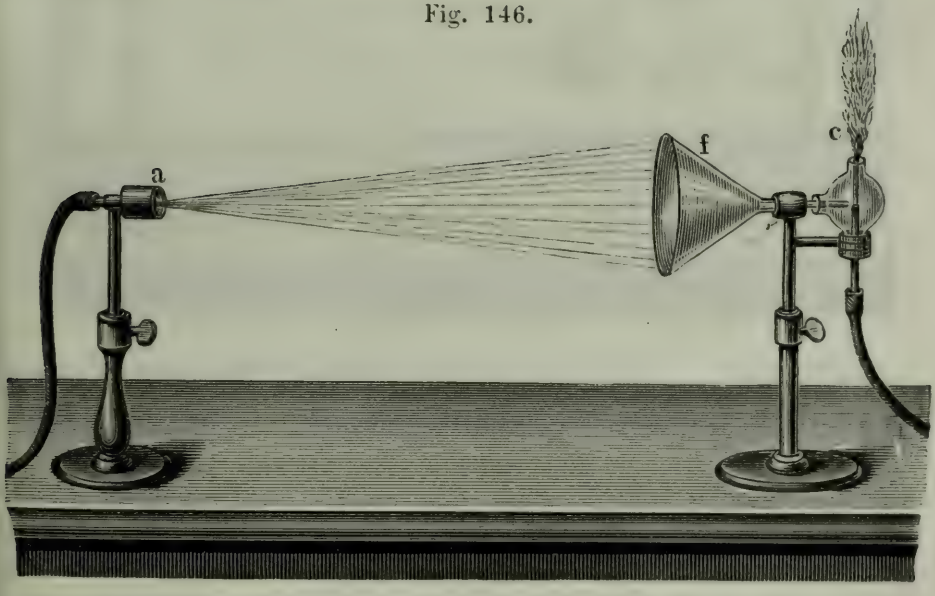


Fig. 146.



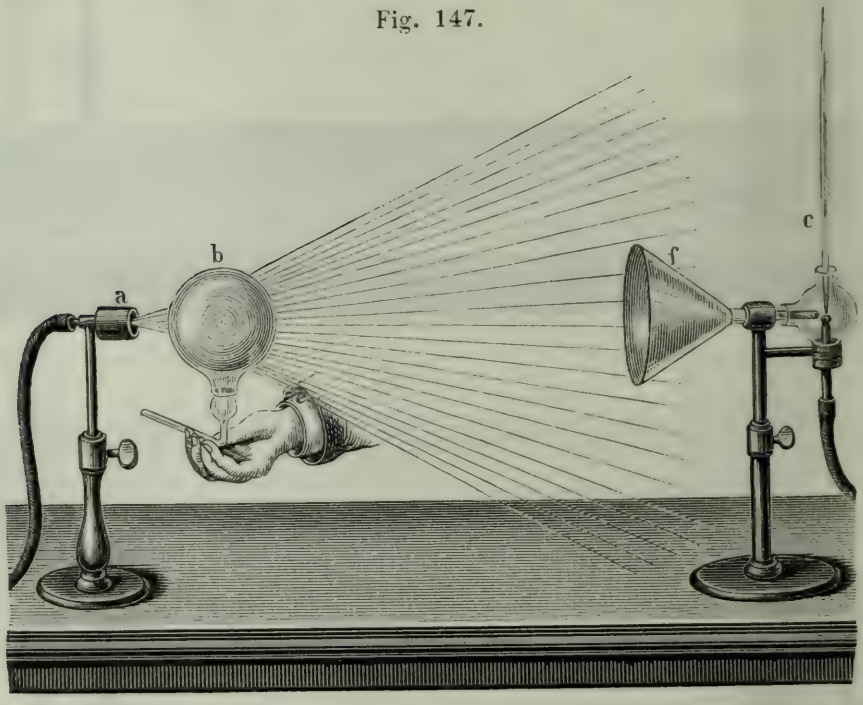
(Fig. 145) vor die Zunge, so geräth die Flamme in stürmische Bewegung, weil die Schallstrahlen [1]) auf sie

[1]) Diese sind durch Linien bezeichnet, die von der Zunge ausgehen.

convergiren. Wird die Blase entfernt, so beruhigt sich die Flamme. Ich wiederhole den Versuch mehrmals, immer mit demselben Erfolge. Diese Wirkung der Blase auf die Schallwellen entspricht genau der Wirkung einer biconvexen Glaslinse auf die Lichtwellen.

Nun kommen wir zu dem umgekehrten Versuch. Der Schall bewegt sich langsamer durch Stickoxydul als durch Luft; daher besitzt dieses Gas die Fähigkeit, die

Fig. 147.



Schallstrahlen zu concentriren. Durch Wasserstoff dagegen bewegt sich der Schall bekanntlich viel schneller als durch Luft. Daher müssen die Schallwellen, wenn sie durch eine Linse aus diesem Gas hindurch gehen, nicht convergiren, sondern divergiren. Wir wollen uns davon überzeugen. Ich bereite, wie oben, mittelst der Plateau'schen Mischung, eine grosse Wasserstoffblase. Bei *a* (Fig. 146 a. v. S.) befindet sich die tönende Zunge, bei *c* die empfindliche Flamme und der Druck

ist so regulirt, dass die Flamme in heftige Bewegung geräth, wenn die Zunge tönt. Nun führe ich die Wasserstoffblase *b* ein (Fig. 147). Die Flamme erhebt sich schlank und stetig und brennt ruhig weiter, so lange die Blase vor der Zunge bleibt. Diese Wirkung tritt ein, weil die Schallwellen divergiren. Sie entspricht genau der Wirkung einer biconcaven Glaslinse auf Lichtstrahlen.

Die hier angewandten Linsen sind ohne jeden Makel. In dieser Beziehung übertreffen sie die Linsen, deren sich Herr Sondhaus bedient. Ausserdem empfangen und übermitteln sie die Bewegung der Schallwellen mit vollkommener Schmiegsamkeit. Stickoxydul ist der Kohlensäure vorzuziehen, weil letztere die äussere Schicht rasch zersetzt, und die Blase zerstört. Es sei hinzugefügt, dass Collodiumballons mit Stickoxydul und Wasserstoff vorzügliche Linsen bilden.

Bei den vorstehenden Bildern ist *f* wie oben, ein Trichter, dessen Stiel die Schallwellen auf die Wurzel der Flamme concentrirt.

§. 16. Empfindliche Rauchstrahlen.

Die eben beschriebenen sonderbaren Erscheinungen rühren nicht von der Flamme als solcher her. Man erhält in der Hauptsache dieselben Wirkungen, wenn man einen Strahl unentzündeten Gases, Kohlensäure, Wasserstoff oder selbst nur Luft, unter passendem Druck aus einer Oeffnung treten lässt. Da man aber keines dieser Gase bei seinem Wege durch die Luft sehen kann, so müssen wir es mit irgend einer Substanz verbinden, die seine Bewegungen theilt und sie zugleich dem Auge sichtbar macht. Viele von Ihnen werden sich der Methode erinnern, die wir anwendeten, um Luftwirbel sichtbar zu machen. Wenn wir auf eine Membran klopfen, die das

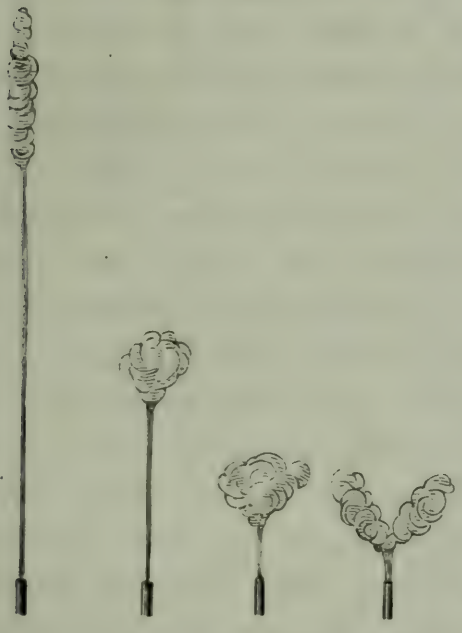
weite Ende eines grossen mit Rauch gefüllten Trichters schliesst, so erhalten wir schöne Rauchringe, die uns die Bewegung der Luft zeigen. Vermischen wir in dem gegenwärtigen Falle Rauch mit unseren Gasstrahlen, so können wir ebenfalls ihren Lauf verfolgen und bei diesem Verfahren erweist sich das unentzündete Gas als ebenso empfindlich wie die Flammen. Die Rauchstrahlen hüpfen, sie verkürzen sich, sie spalten sich in Gabeln, oder verlängern sich zu Säulen, wenn die passenden Töne angegeben werden.

Unter einem Gasometer stehen zwei kleine Gefässe, von denen eines mit Chlorwasserstoffsäure, das andere mit Ammoniak gefüllt ist. Dadurch werden Salmiakdämpfe gebildet, die sich mit dem Gas des Behälters mischen. Wir können, wie schon gesagt, Leuchtgas, Kohlensäure, Luft oder Wasserstoff verwenden, alle geben gute Wirkungen. Aus unserem vortrefflichen Steatitbrenner steigt jetzt eine dünne Rauchsäule auf. Das Pfeifen aber, das auf die Flamme so viel Eindruck machte, bleibt völlig wirkungslos; auch die höchsten Töne einer Panspfeife haben keinen Erfolg, ebensowenig die tiefsten. Wenn aber eine bestimmte Pfeife in der Mitte des Instrumentes angeblasen wird, so fällt die Rauchsäule und bildet einen kurzen Stengel mit einem dicken, krausen Kopf. Auch wenn man auf den Tisch klopft, wird sie niedergeschlagen, als wenn ein Wind von oben auf sie drückte. Bei jedem Schlage fällt sie. Ein Schlag auf einen Amboss dagegen macht wenig oder gar keine Wirkung. Da der Druck hier gering ist, so liegen in der That die wirksamen Töne viel tiefer als bei den Flammen.

Manche dieser Rauchsäulen schrumpfen im Verhältniss zu ihrer Länge viel bedeutender zusammen als die Flammen. Bei einem Schlag auf den Tisch fällt eine 45 cm hohe Rauchsäule zu einem buschigen Strauss

zusammen, dessen Stengel nur 2,5 cm lang ist. Auch der Stimme gehorcht die Rauchsäule. Ein Husten wirft sie nieder und zu dem Klange einer Spieluhr tanzt sie. Bei einzelnen Tönen sammelt sich nur die Spitze der Rauchsäule zu einem Bouquet. Bei anderen bildet sich der Strauss auf halber Höhe, während bei gewissen Tönen von passender Höhe die Säule sich zu einer geballten Wolke zusammenzieht, die kaum mehr als 2,5 cm über dem Ende des Brenners steht. Fig. 148 zeigt verschiedene Formen des tanzenden Strahles. Wird die Musik fortgesetzt, so springt die Rauchsäule in raschem Wechsel von einer Form zur anderen.

Fig. 148.



In einer vollkommen ruhigen Atmosphäre steigen diese schlanken Rauchsäulen manchmal zu einer Höhe von beinahe 60 cm auf, und verschwinden an der Spitze scheinbar in die Luft. Alsdann stehen unsere empfindlichsten Flammen an Feinheit weit hinter diesen Rauchsäulen zurück und ihre wirbelnden Ringe sind, wenn auch weniger frappant als die Flammen, doch oft viel zierlicher. Nicht nur einzelne Worte, sondern jedes Wort und jede Silbe der angeführten Spenser'schen Verse versetzt einen wirklich empfindlichen Rauchstrahl in die grösste Unruhe. Um solche Erfolge zu erzielen, muss man aber eine vollkommen ruhige Atmosphäre haben,

während man mit Flammen in einer Atmosphäre experimentiren kann, in der mit Rauchsäulen gar nichts anzufangen ist [1]).

§. 17. Beschaffenheit flüssiger Strahlen und empfindlicher Wasserstrahlen.

Wir haben uns bisher beschränkt auf Strahlen von entzündetem und unentzündetem Leuchtgas, Kohlensäure, Wasserstoff und Luft; wenden wir uns nun zu Wasserstrahlen. Hierbei kommen wir zu einer Reihe von ungewöhnlich schönen Versuchen, die schon lange bekannt sind und eine gewisse Verwandtschaft mit den eben beschriebenen zeigen. Es sind dies Felix Savart's Versuche über flüssige Strahlen. Wenn man in den Boden eines Gefässes voll Wasser ein rundes Loch macht, so wird der hinabfliessende flüssige Strahl zwei unverkennbar verschiedene Theile zeigen. Der Theil des Strahles zunächst der Oeffnung ist klar und ruhig und gleicht einem festen Glasstabe. Nach unten zu nimmt sein Durchmesser ab bis zu einem Punkte grösster Zusammenziehung, abwärts von dem der Strahl trübe und unruhig aussieht. Der Lauf des Strahles zeigt ausserdem regelmässige Anschwellungen und Einschnürungen. Savart hat den Strahl in der Weise abgebildet, wie Fig. 149 zeigt. Der Theil an, welcher der Oeffnung zunächst liegt, ist klar und ruhig, während sich die ganze Strecke unter n in zitternder Bewegung befindet. Dem Auge erscheint dieser untere Theil des

[1]) Helmholtz sagt über diese Wirkungen: „Die erstaunliche Empfindlichkeit eines mit Rauch imprägnirten cylindrischen Luftstrahles gegen Schall ist von Tyndall beschrieben worden; ich habe dieselbe bestätigt gefunden. Es ist dies offenbar eine Eigenschaft der Trennungsflächen, die für das Anblasen der Pfeifen von grösster Wichtigkeit ist.“ Discontinuirliche Luftbewegung, Monatsbericht, April 1868.

Fig. 149.

Fig. 150.

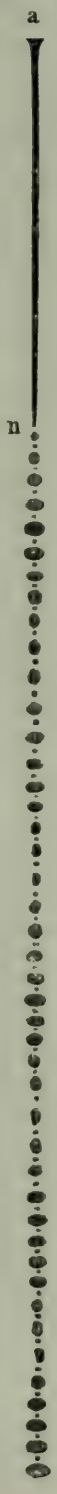


Fig. 151.

Strahles ununterbrochen, doch kann man manchmal mit dem Finger hindurchfahren, ohne nass zu werden. Dies könnte natürlich nicht vorkommen, wenn der Strahl wirklich continuirlich wäre. Durch den oberen Theil des Strahles kann man nicht durchsehen, dagegen ist der untere Theil desselben durchsichtig, selbst wenn man Quecksilber als Flüssigkeit nimmt. Thatsächlich löst sich der Strahl bei *n* in flüssige Kügelchen auf, und seine scheinbare Continuität rührt von der Nachdauer des Eindruckes her, den die fallenden Tropfen auf die Netzhaut machen. Wenn sich die Tropfen in Zwischenräumen von einer Zehntel-Secunde oder noch schneller folgen, so wird der Eindruck, den ein Tropfen macht, schon von seinem Nachfolger erneuert, ehe er Zeit hat, zu verschwinden; daher lässt sich keine Unterbrechung des Zusammenhanges bemerken. Wenn man beim

Betrachten des unruhigen Theiles den Kopf plötzlich senkt, so löst sich die Säule für einen Augenblick in getrennte Tropfen auf. Die einfachste Art, den Strahl in seine ursprünglichen Tropfen zu scheiden, ist vielleicht die, welche ich schon seit langer Zeit anzuwenden pflege, nämlich den Strahl in einem dunklen Zimmer durch eine Reihe elektrischer Blitze zu erleuchten. Jeder Blitz zeigt die Tropfen, als ob sie vollkommen unbeweglich in der Luft hingen.

Könnte das Bild des Strahles, wie ein einzelner Blitz ihn erleuchtet, festgehalten werden, so würde es gleich dem in Fig. 150 (a. v. S.) sein. Und hier entdeckt sich uns die Ursache jener Anschwellungen und Einschnürungen, die der unruhige Theil des Strahles zeigt. Die Tropfen verändern beim Fallen beständig ihre Form. Wo sie sich zuerst von dem klaren Theil des Strahles ablösen, haben die Tropfen die Form länglicher Sphäroide, deren längste Axe vertical steht. Diese Form kann aber eine Flüssigkeit nicht behalten, wenn sie der Kraft ihrer eigenen Molekeln anheim gegeben ist. Das Sphäroid strebt danach, eine Kugel zu werden. Darum verkürzt sich der längere Durchmesser; aber, wie ein Pendel, das in seinen Ruhezustand zurückkehren will, geht die Zusammenziehung der verticalen Axe zu weit, und der Tropfen wird ein oben und unten abgeplattetes Sphäroid. Nun bilden sich die Einschnürungen des Strahles an den Stellen, wo die längste Axe des Tropfens vertical, und die Anschwellungen da, wo sie horizontal steht. Man wird bemerken, dass zwischen je zwei der grösseren Tropfen ein dritter viel kleinerer liegt. Nach Savart bleibt diese Erscheinung nie aus.

Ich möchte Ihnen die Beschaffenheit eines flüssigen Strahles durch einen einfachen aber schönen Versuch

veranschaulichen. Die condensirende Linse wird aus der elektrischen Lampe entfernt und das Licht fällt direct durch einen senkrechten Spalt, der vor der Camera angebracht ist. Der Lichtstrahl, den man auf diese Weise erhält, divergirt so stark, dass er einen Flüssigkeitsstrahl von 1 m Länge in einiger Entfernung von der Lampe von oben bis unten beleuchtet. Unmittelbar vor der Camera befindet sich eine grosse Zinkscheibe mit sechs radialen Spalten von 25 cm Länge und 2,5 cm Breite. Wenn die Scheibe rotirt, fällt das Licht in einzelnen Blitzen auf den Strahl, und bei passender Rotationsgeschwindigkeit löst sich dieser in seine tropfenförmigen Bestandtheile auf. Lässt man den Schatten des Strahles auf einen weissen Schirm fallen, so ist seine Zusammensetzung allen Anwesenden deutlich sichtbar.

Dieses Abbrechen eines flüssigen Strahles in Tropfen ist der Gegenstand vieler Erörterungen gewesen. Savart führte die Stösse auf die Oeffnung des Hahnes zurück, er glaubte jedoch nicht, dass sie durch Reibung verursacht würden. Sie werden von Tonwellen mächtig beeinflusst. Inmitten einer grossen Stadt ist die Luft fast nie still genug, um den continuirlichen Theil des Strahls zu voller Entwickelung kommen zu lassen; doch gelang es Savart, seinen Strahl den Einflüssen solcher unregelmässigen Schwingungen so weit zu entziehen, dass der klare Theil sich bis zu einer Länge ausdehnte, wie auf Fig. 151. Fig. 149 (a. S. 317) zeigt einen Strahl, der den unregelmässigen Erschütterungen der Stadt Paris ausgesetzt ist, während Fig. 151 einen Strahl zeigt, der unter ganz denselben Bedingungen erzeugt, aber diesen Schwingungen entzogen ist.

Die Tropfen, in die sich der Strahl endlich auflöst, bereiten sich schon im klaren Theile vor, wo sie sich als

ringförmige Knoten zu erkennen geben, die immer deutlicher werden, bis sie sich schliesslich trennen. Sie entstehen an der Hahnöffnung selbst und folgen einander schon bei mässigem Druck mit solcher Schnelligkeit, dass ein schwacher musikalischer Ton erzeugt wird. Lässt man die Tropfen auf eine Membran fallen, so kann damit die Höhe dieses Tones bestimmt werden. Und nun kommen wir zu dem Punkte, der die Erscheinungen der flüssigen Strahlen mit denen der empfindlichen Flammen und Rauchstrahlen verbindet. Wenn ein Ton, der mit dem des Strahles übereinstimmt, in seiner Nähe angegeben wird, so verkürzt sich der klare Theil augenblicklich; die Höhe des Tones kann bis zu gewissen Grenzen wechseln, und doch wird Verkürzung eintreten, allein der übereinstimmende Ton ist stets am wirksamsten. Wir haben in unserem Laboratorium kürzlich Savart's Versuche über senkrecht hinabfliessende Strahlen mit überraschendem Erfolge wiederholt. Der klare Theil des Strahles wurde durch den Ton einer Orgelpfeife verkürzt, die 27 m entfernt und nur mässig stark war, aber die richtige Höhe hatte.

Plateau's Untersuchungen über die Gestalten, in denen sich Körper im Gleichgewichte befinden, die der Einwirkung der Gravitation entzogen sind, ergeben, dass ein flüssiger Cylinder fest bleibt, so lange seine Länge nicht das Dreifache seines Durchmessers überschreitet; oder genauer ausgedrückt, so lange das Verhältniss zwischen beiden nicht hinausgeht über das zwischen dem Durchmesser eines Kreises und seinem Umfange, nämlich 3.1416. Sobald dieses Verhältniss überschritten wird, verengert sich der Cylinder an irgend einem Punkte, zerfällt an dieser Stelle und bildet sofort zwei Kugeln. Wenn das Verhältniss des Cylinders zu seinem Durch-

messer weit über 3.1416 hinausgeht, zerfällt er nicht in zwei, sondern in mehrere Kugeln.

Einen flüssigen Cylinder kann man herstellen, indem man Olivenöl in eine Mischung aus Wasser und Alkohol giesst, welche dieselbe Dichtigkeit hat, wie das Oel. Das Oel bildet eine Kugel. Diese Kugel berührt man mit zwei Scheiben, die einen kleineren Durchmesser haben als die Kugel. Wenn man nun die Scheiben von einander entfernt, so haftet das Oel daran und die Kugel verwandelt sich in einen Cylinder. Genügt das Oel nicht, um die äusserste Länge des Cylinders hervorzubringen, so fügt man mit einer Pipette einen Tropfen hinzu. Bei diesem Versuch zeigt sich, dass, wenn das richtige Verhältniss überschritten ist, der eingeschnürte Theil des Cylinders sich verlängert und einen Augenblick in Gestalt eines sehr dünnen flüssigen Cylinders die beiden im Entstehen begriffenen Kugeln verbindet; dass ferner, wenn der Bruch eingetreten ist, der dünne Cylinder, der auch seine richtige Länge überschritten hat, so zerfällt, dass er eine kleine Kugel zwischen den beiden grösseren bildet. Dies ist von wesentlicher Bedeutung für unseren Gegenstand.

Plateau behauptet nun, dass die Wirksamkeit der Molekularkräfte in einem flüssigen Cylinder durch seine translatorische Bewegung nicht aufgehoben wird. Der erste Theil eines Wasserstrahles, der aus einer Oeffnung hervortritt, ist ein Cylinder, auf den dieselben Gesetze, welche Plateau für unbewegliche Cylinder aufgestellt hat, Anwendung finden. Sobald der herabfallende Strahl die richtige Länge überschritten hat, schnürt er sich ein und bildet Tropfen; aber, vorwärts gedrängt durch den Druck von oben und durch seine eigene Schwere, erreicht er in der Zeit, die er zur Abrundung des Tropfens

braucht, eine gewisse Entfernung von der Oeffnung. Wenn der Druck constant bleibt und der Strahl äusseren Störungen entzogen ist, tritt in dieser Entfernung unfehlbar der Bruch ein. Derselbe wird von jener Erscheinung begleitet, die ich soeben als bedeutsam bezeichnet habe: zwischen je zwei auf einander folgenden grossen Tropfen bildet sich ein kleiner, wie auf Fig. 150.

Lässt man einen Oelstrahl aus einer Oeffnung nicht durch die Luft, sondern durch eine Mischung von Alkohol und Wasser von passender Dichtigkeit fliessen, so kann man den continuirlichen Theil des Strahles, seine Auflösung in Tropfen und die Bildung der kleinen Kugel zwischen jedem frei werdenden Tropfen und dem Ende des flüssigen Cylinders mit der grössten Ruhe betrachten. Dieser und andere Versuche werden den Beobachter überzeugen, dass Plateau's schöne Erklärung auch die richtige ist. Die verschiedenen von Savart durch den Versuch festgestellten Gesetze ergeben sich sämmtlich unmittelbar aus der Plateau'schen Theorie.

In einem kleinen, vor vielen Jahren veröffentlichten Aufsatz habe ich darauf aufmerksam gemacht, dass ein herabfallender Flüssigkeitsstrahl, der bei mässigem Druck oberhalb der Bruchstelle eine flüssige Oberfläche schneidet, geräuschlos in die Flüssigkeit eintritt; wenn aber die Oberfläche den Strahl unterhalb der Bruchstelle schneidet, so entsteht sofort ein Geräusch mit reichlicher Blasenbildung. Im ersteren Falle spritzt die Flüssigkeit nicht heftig umher, sondern sammelt sich durch Oberflächenspannung oder Capillaranziehung im Gegensatz zu seiner Bewegung um die Basis des Strahles zu einem Hügel. Dieser Versuch lässt sich mit zwei anderen Beobachtungen von Savart in schöner und lehrreicher Weise verbinden. Abgesehen von der Verkürzung des

continuirlichen Theils durch Schall, fand Savart, dass, wenn er den Strahl mit einer Membran bei einer der Anschwellungen durchschnitt, das Geräusch lauter wurde als bei einer Einschnürung.

Ich lasse nun den Strahl unter sehr geringem Druck aus einer 1,9 cm weiten Röhre ausströmen und geräuschlos in ein Wasserbecken fliessen, dass etwa 25 cm von der Oeffnung entfernt ist. Wenn ich eine Stimmgabel, die 128 Mal in der Secunde schwingt, ertönen lasse, zerfällt der klare Strahl sofort und drei ganze Anschwellungen erheben sich über die Oberfläche. Gleichzeitig vernimmt man das Geräusch von Luftblasen und das ganze Gefäss ist mit denselben erfüllt. Während der Ton ausklingt, wird der continuirliche Theil des Strahles länger und die Blasenbildung nimmt abwechselnd zu und ab. Wenn nämlich die Anschwellungen des Strahles die Oberfläche des Wassers schneiden, so entstehen reichliche und geräuschvolle Blasen; wenn die Einschnürungen die Oberfläche schneiden, sind die Blasen spärlich und kaum vernehmbar. Schliesslich hört der Ton auf und der Strahl wird wieder continuirlich und stetig.

Bringt man ein eisernes Tablett an die Stelle des Wasserbeckens und erregt die Gabel, so beginnt der Strahl, der erst geräuschlos auf das Tablett fiel, zu prasseln; während der Ton ausklingt, steigt und fällt dieses Geräusch, je nachdem Anschwellungen oder Einschnürungen des Strahles die Oberfläche treffen. Diese Versuche sind einfach und schön.

Savart liess seinen Strahl nicht nur senkrecht, sondern auch horizontal und in verschiedenen Neigungen zum Horizont ausströmen und fand, dass in gewissen Fällen Tonschwingungen einen Strahl in zwei oder drei

Arme theilen können. Bei diesen Versuchen ging die Flüssigkeit durch eine Oeffnung in einer dünnen Platte. Wir wollen uns statt dessen wieder unseres bewährten Steatitbrenners bedienen; denn bei Versuchen mit Wasser zeigt er sich anderen Brennern ebenso überlegen, wie

Fig. 152.

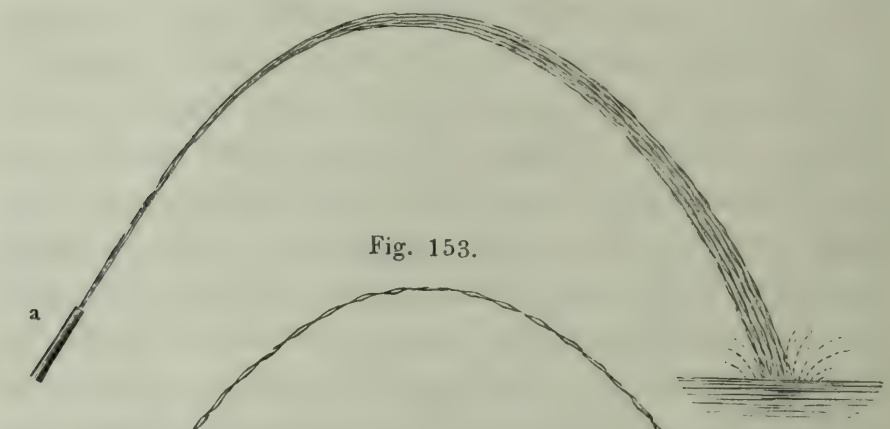


Fig. 153.

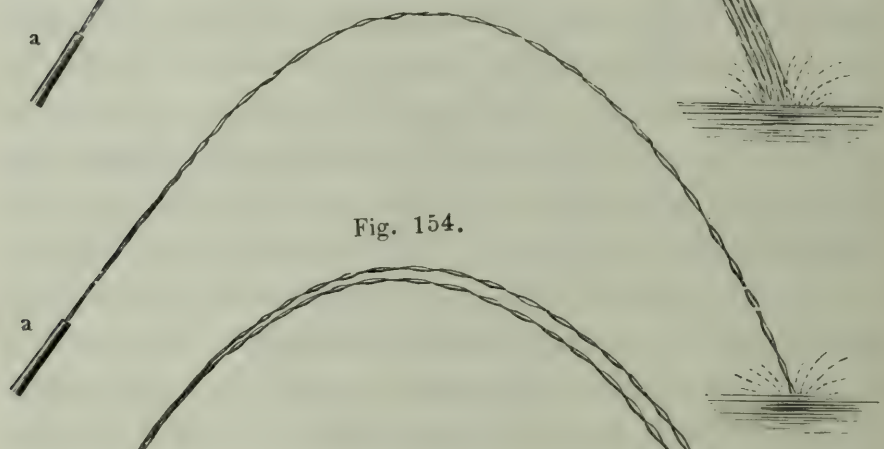
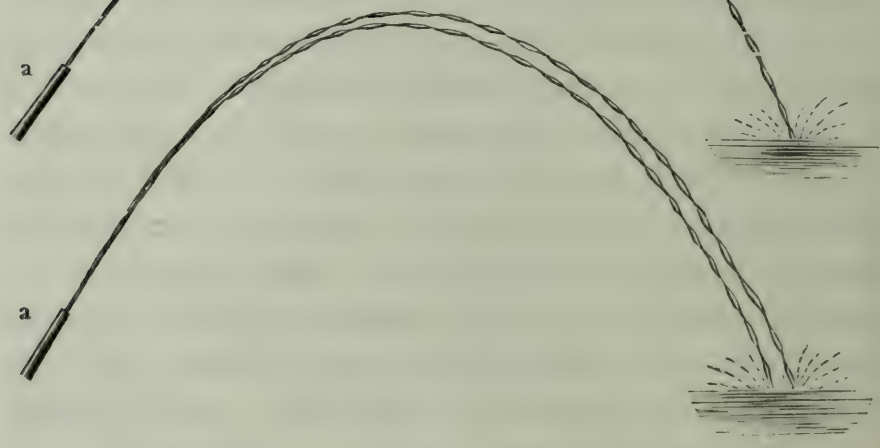


Fig. 154.



bei Flammen und Rauchstrahlen. Er wird uns ausserdem einige ganze neue Wirkungen vorführen.

Der Brenner ist durch einen Gummischlauch mit der Wasserleitung verbunden, und wenn wir ihn schief nach oben richten, giebt er uns einen schönen, para-

bolischen Strahl (Fig. 152). In bestimmter Entfernung von der Oeffnung löst sich der Strahl in schöne Kügelchen, deren Bewegungen nicht schnell genug sind, um den Strahl ununterbrochen erscheinen zu lassen. Am Scheitelpunkt des Parabols ist der Perlenregen etwa 3 cm breit, und weiter von der Oeffnung sind die Tropfen noch weiter von einander zerstreut. Streicht man mit einem Violinbogen über eine Stimmgabel, die 512 Schwingungen in der Secunde ausführt, so schliessen sich die zerstreuten Tropfen, wie von ihrer gegenseitigen Anziehung bewegt, plötzlich an einander und bilden einen scheinbar ununterbrochenen flüssigen Bogen, der einige Fuss hoch und weit ist (Fig. 153). Während der richtige Ton anhält, sieht der Strahl wie ein gefrorenes Band aus, so bewegungslos erscheint er. Wenn ich die Gabel dämpfe, wird der Bogen aus einander gesprengt, und wir haben dasselbe Spiel der flüssigen Perlen wie vorher. Doch lässt jeder Strich mit dem Bogen die Tropfen wieder in ihre gemeinsame Marschlinie zurückfallen.

Eine Stimmpfeife oder eine Orgelpfeife, welche den Ton dieser Stimmgabel giebt, wirkt ebenfalls mächtig auf den Strahl. So auch meine Stimme. Indem ich ihr die richtige Tonhöhe bei mässiger Stärke gebe, sammele ich damit die zerstreuten Tropfen. Allem Anschein nach hat meine Stimme bei einer Entfernung von 18 m ebenso viel Wirkung auf den Strahl, als wenn ich dicht neben dessen Ausflussstelle stehe.

Lässt man eine runde, radial geschlitzte Zinkscheibe rasch rotiren, so kann man damit eine Reihe von Lichtblitzen auf den Strahl werfen. Auf diese Weise tritt seine Auflösung in Tropfen deutlich hervor; auch wenn sich beim Angeben des passenden Tones am

Ende des continuirlichen Theiles neue Tropfen bilden und anordnen, wird dies einem grossen Zuschauerkreise sichtbar. Der Versuch ist ausserordentlich schön.

Die Wirkung von Tonschwebungen auf den Strahl ist ebenfalls lehrreich und schön. Man kann diese entweder durch Orgelpfeifen oder durch Stimmgabeln hervorrufen. Sie sehen hier zwei Gabeln, deren eine 512 Mal und die andere 508 Mal in der Secunde schwingt. In unserer nächsten Vorlesung werden Sie erfahren, dass, wenn zwei Stimmgabeln zusammen schwingen, von denen die eine 512 Mal, die andere 508 Mal in der Secunde schwingt, vier Schwebungen in der Secunde entstehen. Lasse ich diese beiden Gabeln klingen, so zeigt sich, dass der flüssige Strahl seine Perlen im Einklang mit den Schwebungen sammelt und wieder verstreut. Steht man neben dem Strahl, so bemerkt man im Tact mit den Schwebungen eine rhythmische Bewegung der Lichtpünktchen, die sich im Strahle spiegeln. Auch das abwechselnde Vor- und Zurückgehen des Punktes, wo sich die Tropfen zu bilden anfangen, geschieht im gleichen Tempo und ist äusserst interessant. Die Empfindlichkeit dieses Strahles ist erstaunlich, sie kann sich mit der des Ohres selbst messen. Stellt man die beiden Stimmgabeln auf einen entfernten Tisch und lässt die Schwebungen allmählich ausklingen, so setzt der Strahl seinen Rhythmus beinahe so lange fort, als man noch etwas hören kann. Wäre der Strahl noch empfindlicher, so würde er sich sogar dem Ohre überlegen zeigen; eine staunenswerthe Thatsache, wenn man die wunderbare Feinheit dieses Organs in Betracht zieht[1]).

[1]) Als diese beiden Stimmgabeln mit einem Gefäss in Berührung gebracht wurden, von dem ein flüssiger Strahl ausging, hielt die sicht-

Wenn ich eine Leydener Flasche in den Stromkreis einer starken Inductionsspule einschalte, so erhalte ich eine Reihe blendender Lichtblitze von der Dauer eines Augenblicks. In einem verdunkelten Zimmer zeigt jeder derartige Lichtblitz die Tropfen einzeln, und jeder derselben wird in ein leuchtendes Sternchen verwandelt. Unter der Einwirkung des geeigneten Tones sammelt der Strahl seine Tropfen zu einer Perlenschnur von unvergleichlicher Schönheit.

Bei diesen Versuchen schliessen sich die Tropfen, wenn der passende Ton angegeben wird, zu einem gebogenen Strahl an einander, aber durch Veränderung der Bedingungen kann man ihn sich auch in zwei oder mehr Arme theilen lassen, wie Fig. 154 (a. S. 324) zeigt. Abbildungen vermögen hier nichts, denn das Wunderbare dieser Versuche beruht allein auf dem plötzlichen Uebergange von einem Zustande in den anderen. Die Ueberraschung liegt in der Bewegung, die durch keine Zeichnung wiedergegeben werden kann [1]).

---

bare Einwirkung auf den Strahl noch an, nachdem die Gabeln schon lange nicht mehr zu hören waren.

[1]) Die Versuche über tönende Flammen sind in der letzten Zeit durch meinen Assistenten Cotrell bedeutend ausgedehnt worden. Lässt man eine Flamme gegen die andere reiben, so können verschiedene musikalische Töne entstehen, von denen einzelne denen einer Trompete, andere denen einer Lerche gleichen. Durch die Reibung unentzündeter Gasstrahlen werden ähnliche, nur weniger schlagende Wirkungen erreicht. Wenn man die beiden Flammen eines Fischschwanzbrenners auf eine Platinplatte stossen lässt, wie bei Scholl's „Perfectoren", so sind die Töne trompetenartig und sehr laut. Zwei entzündete Gasstrahlen können sich abplatten wie Savart'sche Wasserstrahlen. Sie können sich auch zu zwei hohlen Hörnern zusammen rollen, wobei sie ein höchst lehrreiches Beispiel der Helmholtz'schen „Wirbelflächen" liefern. Die von der Flamme freigemachten Kohletheilchen steigen mit den Hörnern in continuirlichen roth- oder weissglühenden Spiralen auf, welche mehrere Centimeter über ihrem Entstehungsort wieder erlöschen.

Uebersicht der sechsten Vorlesung.

Singende Flammen.

Wenn eine Gasflamme in einer Röhre brennt, so wird die Luft, indem sie über die Flamme hin geht, in Schwingung versetzt, wodurch musikalische Töne entstehen.

Bringt man die hohe Temperatur der Luftsäule über der Flamme in Anschlag, so ist die Höhe des Tones gleich der einer offenen Orgelpfeife, die ebenso lang ist als die Röhre.

Die Schwingungen der Flamme, während der Ton anhält, bestehen darin, dass die Flamme in rhythmischer Reihenfolge ganz oder halb erlischt, dazwischen aber ihre Helle theilweise wiedergewinnt.

Die Regelmässigkeit der Erscheinung kann mittelst eines Hohlspiegels gezeigt werden, der ein Bild der schwingenden Flamme auf einen Schirm wirft. Wenn das Bild scharf und deutlich ist, so macht die Rotation des Spiegels aus dem einzelnen Bilde eine Reihe getrennter Bilder der Flamme. Die dunklen Stellen zwischen den Bildern entsprechen dem Erlöschen der Flamme, während die Bilder selbst ihr Wiederaufleuchten anzeigen.

Die Flamme kann ausser dem Grundton der betreffenden Röhre auch noch die höheren Obertöne derselben geben. Die Luftsäule ist dabei in derselben Weise getheilt wie eine offene Orgelpfeife, wenn deren Obertöne angegeben werden.

Giebt man einen Ton an, der fast im Einklange ist mit einer Röhre, in der eine stumme Flamme brennt, so hüpft die Flamme, und wenn ihre Stellung in der Röhre richtig

gewählt ist, wird der fremde Ton sie sogar zum Singen veranlassen.

Während die Flamme singt, erregt ein Ton, der mit ihrem eigenen beinahe, aber nicht ganz im Einklange ist, Schwebungen, und man sieht die Flamme im Rhythmus der Schwebungen hüpfen. Das Hüpfen tritt auch ein, wenn die Flamme in ihrer Röhre eine Stellung einnimmt, bei der sie nicht singen kann.

Empfindliche Flammen.

Wenn der Druck auf das Gas, welches eine freie Flamme speist, gesteigert wird, so nimmt die Flamme bis zu einem gewissen Punkte an Umfang zu. Wenn aber der Druck zu stark wird, so braust oder flackert die Flamme.

Das Brausen oder Flackern der Flamme rührt her von den Schwingungen, in welche das Gas an der Oeffnung des Brenners geräth, wenn der Druck, der es hindurch treibt, sehr stark wird.

Wenn ausserdem noch durch einen fremden Ton Schwingungen an der Oeffnung des Brenners erzeugt werden, so flackert die Flamme schon unter geringerem Druck, als unter gewöhnlichen Umständen.

Das Gas, das unter übermässigem Drucke steht, wird beim Durchgang durch den Brenner in Schwingungen von bestimmter Dauer versetzt. Um die grösste Wirkung auf die Flamme auszuüben, muss der äussere Ton Schwingungen enthalten, die mit denen des ausströmenden Gases übereinstimmen.

Wenn ein solcher Ton gewählt und die Flamme dem Punkte des Flackerns nahe genug gebracht ist, bildet sie ein akustisches Reagens von unvergleichlicher Feinheit.

Auf eine Entfernung von 30 m zum Beispiel würde durch das Zwitschern eines Sperlings die Flamme in Aufruhr gebracht werden.

Die Divergenz und Convergenz der Schallwellen kann in schöner und schlagender Weise erläutert werden durch

Seifenblasen, die einerseits mit Stickoxydul, andererseits mit Wasserstoff gefüllt sind. Die convergirende Schalllinse versetzt eine ruhige empfindliche Flamme in heftige Bewegung. Die divergirende Schalllinse beruhigt eine heftig bewegte Flamme vollständig. Die Wirkung biconvexer und biconcaver Glaslinsen auf Licht wird also für den Schall genau wiederholt.

Es ist nicht die Flamme als solche, der wir diese Erscheinungen zuzuschreiben haben. Wir erhalten im Allgemeinen ähnliche Wirkungen, wenn wir Strahlen von unentzündetem Leuchtgas, Kohlensäure, Wasserstoff oder Luft anwenden. Diese Strahlen können durch Rauch sichtbar gemacht werden, und die Rauchstrahlen zeigen eine Empfindlichkeit für Tonwellen, die sogar die der Flammen übertrifft.

Wenn eine helle, empfindliche Flamme in einem dunklen Zimmer brennt, in dem man eine passende Glocke anschlägt, so wird das Licht durch den Schall periodisch ausgelöscht. Jeder Glockenschlag ist von einer Verdunkelung des Zimmers begleitet.

Ein Wasserstrahl, der aus einer runden Oeffnung ausströmt, besteht aus zwei Theilen; einem klaren, ruhigen und einem bewegten Theil. In passender Weise zerlegt, erweist sich der erstere Theil als continuirlich, der letztere besteht aus einer Reihe von Tropfen.

Wenn diese Tropfen auf eine Membran fallen, erzeugen sie einen musikalischen Ton. Wird ein äusserer Ton von derselben Höhe in der Nähe des Wasserstrahles erzeugt, so verkürzt sich der Wasserstrahl.

Der discontinuirliche Theil des Strahles zeigt abwechselnde Anschwellungen und Einschnürungen. Bei ersteren sind die Tropfen abgeplattet, bei letzteren in die Länge gezogen. Die abgeplatteten Tropfen erzeugen, wenn sie auf die Membran fallen, einen lauteren Ton, als die in die Länge gezogenen Tropfen.

Oberhalb der Bruchstelle tritt ein Wasserstrahl geräuschlos in Wasser ein. Aber sobald der passende Ton angegeben wird, hört man sofort das Geräusch von Blasen; der dis-

continuirliche Theil des Strahles erhebt sich über die Oberfläche und während der Ton ausklingt, erzeugen die abwechselnden Anschwellungen und Einschnürungen periodische Veränderungen in der Menge und dem Geräusch der Blasen.

Bei schräg ausgesandten Strahlen werden die Wassertropfen durch einen passenden Ton gesammelt, so dass sie einen scheinbar continuirlichen Bogen bilden.

Flüssige Strahlen zerlegt man, indem man sie mit elektrischen Funken oder mit einer Reihe von Lichtblitzen beleuchtet.

Siebente Vorlesung.

Erster Theil.

Untersuchungen über die akustische Durchlässigkeit der Atmosphäre in Beziehung zur Frage der Nebelsignale.

Einleitung. — Instrumente und Beobachtungen. — Einfluss des Schallschattens. — Widersprechende Resultate. — Lösung der Widersprüche. — Luftreflexion und ihre Ursachen. — Luftechos. — Akustische Wolken. — Experimentelle Darstellung des Aufhaltens des Schalles durch Luftreflexion.

§. 1. Einleitung.

Eine der ersten Pflichten eines seefahrenden Volkes ist die Sorge für seine Matrosen und eine der grössten Gefahren bietet für den Matrosen die Nähe der Küste bei Nacht. Daher suchte man ihn schon seit lange vor solcher Nähe durch Leuchtfeuer zu warnen, die man theils auf natürlichen Höhen, theils auf Thürmen anbrachte, die eigens zu diesem Zwecke erbaut worden waren. Nahe bei Dover Castle steht zum Beispiel ein alter Leuchtthurm dieser Art.

Als sich unsere Marine vergrösserte, bedurfte man grösserer Hülfsmittel und es strömten Lampen, die mit Spiegelreflectoren versehen worden waren, ihr Licht über das Meer aus. Mehrere dieser Lampen wurden

bisweilen so zusammen gruppirt, dass das Licht vereint wurde und es in der Entfernung aus einer einzigen Quelle auszuströmen schien. Diese „katoptrische“ Form des Apparates wird noch hin und wieder in unseren Leuchtthürmen benutzt, ist aber doch schon seit langer Zeit allmählich durch die grossen Linsen ersetzt worden, die der berühmte Franzose Fresnel erfunden hatte.

In einem guten „dioptrischen“ Apparat strömt das Licht von einer Lampe mit verschiedenen concentrischen Dochten aus, deren Flamme, da sie durch einen starken Zug genährt wird, eine grosse Helligkeit erreicht. Die Linsen reflectiren und breiten bei feststehenden Lichtern die von der Lampe ausgehenden Strahlen so aus, dass sie eine Lichtfläche bilden, welche sich über den Seehorizont hinlagert. Die Linsen in den rotirenden Lampen sammeln die Strahlen in scharf begrenzten Streifen, die den Speichen eines Rades gleichen, über die See schweifen und nach einander das Auge des Seefahrers treffen.

Die grösste Verstärkung des Lichtes ist nicht für schönes klares Wetter bestimmt, denn da braucht man sie nicht; auch nicht für dichtes Nebelwetter, denn da ist sie nutzlos. Aber in den dazwischen liegenden Abstufungen von Nebel, Schnee oder Regenwetter kann das mächtige Licht sich behaupten, während ein schwaches ausgelöscht wird. Die gewöhnliche erstclassige Lampe hat vier Dochte, aber Mr. Douglass (jetzt Sir James Douglass), der geschickte und unermüdliche Ingenieur des Trinity House, hat die Zahl der Dochte auf sechs vermehrt, die eine sehr grosse Flamme erzeugen [1]).

[1]) Eine Lampe mit acht Dochten ist kürzlich unter der Aufsicht des Ingenieurs des Trinity House angefertigt worden.

Der sechsdochtigen Lampe gingen die Brenner von Wigham aus Dublin voraus und übertrafen sie an Leuchtkraft; ihm verdanken wir auch die erfolgreiche Anwendung des Gases zur Beleuchtung der Leuchtthürme. Auf einigen Leuchtthürmen schwankt die Anzahl der Flammen von 28 bis 108, ja auf dem Leuchtthurm von Galley Head konnte man, wenn man wollte, 432 Flammen anwenden. Diese grössere Anzahl wurde nur beim Nebel benutzt. Der 28-Flammenbrenner genügt vollauf für klares Wetter. Der Uebergang vom kleinen zum grossen Brenner und vom grossen zum kleinen Brenner wird leicht, schnell und sicher bewirkt. Diese Anwendung des Gases ist Irland eigenthümlich und die Handelskammer hat nur im allgemeinen Interesse gehandelt, als sie Wigham jede Erleichterung zur Entwickelung seiner Erfindung gewährte.

Die Elektricität ist das letzte grosse Agens, das man bei der Erleuchtung der Leuchtthürme benutzte. Hier in diesem Institut, im Jahre 1831, bewies Faraday die Existenz der inducirten Ströme, die in unseren Tagen eine so grossartige Entwickelung genommen haben, und er erklärte hier ihre Gesetze. In Beziehung zu dieser Frage haben die Worte Faraday's einen prophetischen Klang: „Ich habe lieber", schreibt er 1831, „neue Thatsachen und neue Beziehungen für die magnetisch-elektrischen Inductionen finden wollen, als die Kräfte schon bekannter steigern, in der Ueberzeugung, dass die letzteren in der Zukunft ihre volle Entwickelung finden würden." Die Arbeiten der neueren Elektriker bilden die glänzende Erfüllung dieser Prophezeiung.

Unsere intensivsten Lichter, mit Einschluss der sechsdochtigen Lampe, des Wigham'schen Gaslichtes und des elektrischen Lichtes, die alle dazu bestimmt

sind, dem Seefahrer in bösem Wetter zu helfen, kann man in gewissem Sinne als Nebelsignale ansehen. Die Wolke aber, die der Dampf der Locomotive erzeugt, kann die Strahlen der Mittagssonne vernichten; so können wir uns auch nicht wundern, wenn in dickem Nebel unsere stärksten Küsten-Leuchtthürme, selbst das elektrische Licht, für den Seefahrer nutzlos werden.

Verhängnissvolle Schiffbrüche sind die Folge. In den zehn Jahren bis 1874 wurde von nicht weniger als 273 Schiffen bekannt, dass sie an unseren eigenen Küsten in Nebel oder trübem Wetter vollständig untergegangen waren. Noch grösser ist der Verlust, wie ich glaube, an der amerikanischen Küste, wo der Handel lebhafter und die Nebel häufiger sind als hier. Es ist daher kein Wunder, dass man ernste Anstrengungen machte, um einen Ersatz für das Licht in den Schallsignalen zu finden, die laut genug ertönen sollten, um die Seefahrer zu warnen und zu leiten, wenn sie noch in sicherer Entfernung von der Küste sind.

Solche Signale sind in einiger Ausdehnung an unseren eigenen Küsten eingeführt worden, in weit grösserem Maasse aber an den Küsten von Canada und den Vereinigten Staaten. Die Resultate bei der Prüfung ihres Werthes und ihrer Leistungsfähigkeit waren aber voll Widersprüche und es war keine Untersuchung eingehend genug, um die Unsicherheit und die widersprechenden Beobachtungen zu erklären.

Bald nach meiner Rückkehr von Amerika, 1873, wurde ich von Seiten des Trinity House ersucht, die Leitung einer Untersuchung zu übernehmen, die die hier vorhandene Lücke ausfüllen könnte. Ich übernahm sie mehr aus Pflichtgefühl, als in der Hoffnung, etwas zu erreichen, denn ich fürchtete, dass die Beobachtungen

mühsam und die wissenschaftlichen Resultate unsicher sein würden. Das Studium irgend einer naturwissenschaftlichen Frage aber, wenn es nur consequent verfolgt wird, belohnt zuletzt stets den Forscher. Und so auch dieses Mal; nach einigem vorläufigen Herumtasten begann Licht in der Frage zu werden, viele alte Irrthümer wurden aufgedeckt und viele neue Wahrheiten enthüllt.

§. 2. Stand der Frage.

Dr. Robinson[1]) von Armagh fasst unsere Kenntniss der Nebelsignale in einem Briefe an den Präsidenten der Handelskammer 1863 folgendermaassen zusammen: „Fast Alles, was man über Nebelsignale weiss, findet sich in dem Bericht über Leuchtthürme und Leuchtfeuer, und davon ist Vieles wenig mehr als Vermuthung.“ Der Inhalt ist folgender:

„Licht ist kaum verwendbar für diesen Zweck. Man verwendet blaue Lichter im Hoogly; es ist aber noch nicht festgestellt, bis zu welcher Entfernung sie im Nebel sichtbar sind; ihr Glanz kann weiter gesehen werden als ihre Flamme. Wünschenswerth wäre es indess, zu bestimmen, wie weit das elektrische Licht oder sein Strahl verfolgt werden können[2]).

Schall ist das einzig bekannte, wirklich erfolgreiche Hülfsmittel; aber über ihn sind die Zeugnisse widersprechend und es giebt kaum einen Fall, wo man seinen Nutzen als Signal als sicher anerkennt. Selbst das Wichtigste von Allem, die Entfernung, in welcher er nicht mehr gehört wird, ist unentschieden.

---

[1]) Bericht der British Association für 1863, p. 105.

[2]) Mächtige elektrische Leuchtthürme sind seitdem an der Küste von England errichtet worden.

Bis jetzt sind alle Schallsignale in der Luft gemacht worden, obgleich dieses Medium grosse Nachtheile bietet: seine eigenen Strömungen treffen mit den Schallwellen zusammen, so dass ein Schuss oder eine Glocke, die man einige Kilometer in der Richtung des Windes hörte, schon einige Meter gegen seine Richtung unhörbar sind. Das Schlimmste aber ist, dass der Schall am wenigsten wirksam ist, wenn man ihn am nothwendigsten braucht; denn der Nebel ist ein gewaltiger Dämpfer des Schalls."

Dr. Robinson spricht hier die allgemein angenommene Ansicht aus, und giebt dann die theoretische Ursache der akustischen „Dunkelheit" des Nebels. „Nebel," so sagt er, „ist eine Mischung von Luft und Wasserkügelchen und an jeder dieser unzählbaren Oberflächen, wo deren zwei sich berühren, wird ein Theil der Bewegung reflectirt und geht verloren.....[1]). Schnee bringt dieselbe Wirkung hervor, nur dass er noch schädlicher wirkt."

Da man also annimmt, dass Reflexion an den Oberflächen der suspendirten Theilchen eintritt, so folgt daraus, dass je grösser die Zahl der Theilchen oder mit anderen Worten, je dichter der Nebel, desto schädlicher sein Einfluss auf den Schall sein muss. So kam man dazu, optische Durchsichtigkeit als ein Maass für akustische Durchlässigkeit anzusehen. Ueber diesen Punkt spricht sich Dr. Robinson in dem angeführten Briefe folgendermaassen aus:

Es ist klar, dass wir im Anfang, um die Versuche vergleichen zu können, ein Maass haben müssen,

---

[1]) So sieht auch Sir John Herschel diese Frage an. Essay über den Schall, Part. 38.

wie weit die Kraft des Nebels reicht, um den Schall aufzuhalten, sonst könnten wir die wunderbarsten Resultate erhalten. Wahrscheinlich scheint es, dass er in irgend einer einfachen Beziehung zu seiner Undurchdringlichkeit für das Licht stehen wird, und dass die Entfernung, in der ein gegebener Gegenstand, eine Flagge oder eine Stange, verschwindet, als Maass genommen werden kann. Danach ist „stille klare Luft“ in diesem Briefe als der beste Träger des Schalls anzusehen, die angeführte Wirkung des Nebels, Regens und Schnee wird dem zugeschrieben, dass sie die Atmosphäre zu „einem discontinuirlichen Medium machen“.

Wir verdanken Dr. Alexander Beazeley eine ausserordentlich nützliche Zusammenstellung alles Wissenswerthen über Nebelsignale [1]). Er classificirt die verschiedenen, bisher benutzten Instrumente und giebt Rechenschaft über ihre Wirksamkeit. Was nun die Wirkung des Nebels auf den Schall betrifft, so stimmen die Thatsachen, die er in seiner Abhandlung anführt, mit den mitgetheilten Anschauungen von Dr. Robinson überein. „Der Nebel,“ sagt er, „besitzt eine merkwürdige Kraft den Schall zu ersticken, und verfährt in dieser Beziehung so unregelmässig, dass Versuche, die in klarem Wetter angestellt werden, keinen oder sehr geringen praktischen Werth haben und nur als eine vergleichende Prüfung verschiedener Instrumente angesehen werden können.“

Es wird erzählt, dass in der Besprechung, die der Verlesung der Abhandlung von Dr. Beazeley in der Institution of Civil Engineers folgte, Dr. Gladstone,

---

[1]) Proceedings of the Institution of Civil Engineers, March 14. 1871 und Vorlesung an der United Service Institution, May 24. 1872.

der ein Mitglied der Commission für Leuchtthürme und Leuchtfeuer gewesen war, gesagt habe: Eine Schwierigkeit in der Benutzung des Schalls ist die, dass der Nebel den Schall empfindlich erstickt; aber die Erfahrungen widersprechen sich sehr in diesem Punkte. Es war schwer, in einem Nebel im Inland das Vorbeifahren der Wagen oder ein Geräusch in der Nähe zu hören und so wurde es in einem Nebel auf See diesen Signalen schwer, den Nebel zu durchdringen, gegen den sie ein Schutz sein sollten.

Bei derselben Gelegenheit erklärte James N. Douglass, der Ingenieur vom Trinity House, für dessen Gewissenhaftigkeit als Beobachter ich Bürge sein kann, dass nach seiner Erfahrung „er nur geringen Unterschied in der Fortbewegung des Schalls in nebligem oder in klarem Wetter gefunden habe: Er hatte im Nebel bei den Small's Rock in dem Bristol Canal ganz deutlich die Schüsse gehört, die in Milford, in einer Entfernung von 40 km abgefeuert wurden.“ Auch Beazeley hatte die Schüsse von Lundy Island in Hartland Point, in einer Entfernung von 16 km bei dichtem Nebel gehört; so dass er am Schluss der Abhandlung zugeben musste, „dass die Frage noch sehr unklar wäre und dass, je mehr man sich mit ihr beschäftigte, die Thatsache immer offenbarer würde, dass die Angaben der Wirkung des Nebels auf den Schall noch sehr widersprechend seien.“

Professor Osborne Reynolds trat mit grosser Entschiedenheit für die herrschende Theorie, der er sich anschloss, in einer Abhandlung ein, die er der Literary and Philosophical Society of Manchester am 16. December 1873 überreichte und machte einen sehr sinnreichen Versuch, sie zu erklären. „Dass der Schall,“ sagt Professor

Reynolds, „nicht leicht den Nebel durchdringt, ist eine bekannte Thatsache. Man hört die Glocken und Hörner der Schiffe nicht so weit im Nebel, als im klaren Wetter. Das Geräusch der Räder wird in einem Londoner Nebel bedeutend vermindert, so dass man die Wagen noch weit fort wähnt, wenn sie in der That schon ganz nahe sind.“ Professor Reynolds hält die Reflexion auf den Oberflächen der Theilchen nicht für genügend, um die Undurchlässigkeit des Nebels für den Schall zu erklären. Er schreibt der Reibung zwischen der Luft und den darin suspendirten fremden Theilchen den Verlust zu. „Die Wirkung,“ sagt er, „von Schallwellen, die durch einen Theil Luft hindurchgehen, ist die, ihn zuerst zu beschleunigen und dann ihn zurückzuhalten. Und sind dann einige Wassertropfen in der Luft, so werden diese die Bewegung in der Luft nicht so willig aufnehmen, als diese selbst. Sie lassen die Luft rückwärts und vorwärts an sich vorbeigehen, und erzeugen so Reibung und vermindern die Wirkung.“

Wir werden später beweisen, sowohl durch Versuche als durch Beobachtung, dass der Nebel keine solche Wirkung, wie die ihm oben zugeschriebene, auf den Schall ausübt.

§. 3. Instrumente und Beobachtungen.

Die vorhergehenden Auszüge und Citate bezeichnen genügend den unsicheren Stand der Frage, als am 19. Mai 1872 die im Folgenden mitgetheilte Untersuchung begann. Das South Foreland bei Dover wurde zur Signalstation bestimmt, nachdem dort schon so viel Dampfkraft aufgestellt worden war, um zwei mächtige magnetisch-elektrische Lichter zu erzeugen. Die meisten

Beobachtungen wurden auf dem Wasser angestellt, wozu gewöhnlich eine der Yachten der Trinity Corporation benutzt wurde. Es waren zwei Stationen eingerichtet worden, die eine auf der Spitze, die andere am Fusse der South Foreland-Klippe und jede erhielt Trompeten und Luft- und Dampfpfeifen von gewaltiger Grösse. Die zuerst benutzten Pfeifen waren englisches Fabrikat; wir hörten aber noch von einer grossen Pfeife der Vereinigten Staaten und von einer Canadischen Pfeife von anerkannt grosser Stärke und nahmen diese noch mit hinzu.

Am 8. October wurde noch ein anderes Instrument eingeführt, das eine besonders hervorragende Rolle bei diesen Beobachtungen gespielt hat. Ich begleitete während meines Besuches in Amerika den General Woodruff nach Sandy Hook in der besonderen Absicht, die Wirkung einer Dampfsirene zu beobachten, die unter der Aufsicht von Professor Joseph Henry in das Leuchtthurmsystem der Vereinigten Staaten aufgenommen worden war. Ich nahm eine sehr lebhafte Erinnerung an die mechanische Wirkung des Schalls auf meine Ohren und meinen ganzen Körper mit nach Hause. Daher mein Wunsch, die Sirene in South Foreland versucht zu sehen. Dem formalen Ausdruck dieses Wunsches kam die Corporation zuvor, während ihren Wünschen wieder die liebenswürdige Freundlichkeit der Leuchtthurm-Commission in Washington entsprach. Als die Commission durch Mr. Elliot, Major in der Armee der be-Vereinigten Staaten, hörte, dass unsere Untersuchungen begonnen hätten, schickte die Commission das mächtige Instrument der Corporation zum Versuch und es wurde in South Foreland aufgestellt.

In der Mr. Brown in New York patentirten Dampfsirene werden eine feste Scheibe und eine rotirende

Scheibe angewendet, wie in der gewöhnlichen Sirene; radiale Schlitze sind in beiden Scheiben statt der runden Oeffnungen eingeschnitten. Eine Scheibe wird vertical über dem Hals der conischen Trompete befestigt, die 4,9 m lang ist und 13 cm im Durchmesser hat, wo die Scheibe sie kreuzt, und die sich allmählich erweitert, bis sie am anderen Ende einen Durchmesser von 0,7 m erreicht. Hinter der befestigten Scheibe ist die rotirende, die durch einen besonderen Mechanismus getrieben wird. Die Trompete ist mit einem Dampfkessel verbunden. Bei unseren Versuchen wurde meistens Dampf von 35 kg Druck verwendet. Wie bei der gewöhnlichen Sirene, wenn die radialen Schlitze der beiden Scheiben zusammentrafen und zwar nur dann, entströmte ein starker Dampfstoss. Auf diese Weise werden Schallwellen von grosser Intensität durch die Luft gesendet; die Höhe des erzeugten Tones hängt von der Geschwindigkeit der Rotation ab.

Drei Geschütze, ein 18 Pfünder, eine 14 cm Haubitze und ein 23 cm Mörser wurden der Sirene, den Trompeten und Pfeifen zugefügt. Bei unseren Versuchen im Sommer feuerten wir alle drei ab; da sich aber die Haubitze den anderen Geschützen überlegen bewies, wurde sie für unsere Versuche im Herbst ausgewählt, als ein nicht nur schöner, sondern auch geeigneter Vertreter dieser Art der Signale. Die abgefeuerten Ladungen waren zum grossen Theil dieselben, die noch jetzt in Holyhead, Lundy Island und auf dem Kish Leuchtschiff angewendet werden, nämlich drei Pfund Pulver. Wir wendeten keine Gongs und Glocken bei diesen Versuchen an, da sich bei früheren Beobachtungen klar herausgestellt hatte, dass sie weit hinter den Trompeten und Pfeifen zurück blieben.

Der Leser hat so eine allgemeine Kenntniss der benutzten Instrumente erhalten, während die Zeichnung (Fig. 155) ihn über die Lage der meisten in dieser Abhandlung besprochenen Orte unterrichtet.

Am 19. Mai waren die zu prüfenden Instrumente:

Auf der Spitze der Klippe:

a. Zwei messingene Trompeten oder Hörner, von 3,4 m Länge, 5 cm Durchmesser am Mundstück und einer Oeffnung von 57 cm Durchmesser am anderen Ende. Sie waren mit vibrirenden Stahlstäben von 23 cm Länge, 5 cm Weite und 0,6 cm Dicke versehen und wurden durch Luft von 9 kg Druck zum Tönen gebracht.

b. Eine Pfeife, die wie die der Locomotive geformt war, von 15 cm im Durchmesser, und die auch durch Luft von 9 kg Druck zum Tönen gebracht wurde.

c. Eine Dampfpfeife von 30 cm Durchmesser, die an dem Dampfkessel befestigt war und durch Dampf von 32 kg Druck zum Tönen gebracht wurde.

Am Fusse der Klippe:

d. Zwei Trompeten oder Hörner von derselben Grösse und Einrichtung wie die obigen und durch Luft von demselben Druck zum Tönen gebracht.

e. Eine Luftpfeife von 15 cm, der obigen ähnlich, und durch dieselben Mittel zum Tönen gebracht.

Die oberen Instrumente waren 70 m über der Hochwassergrenze, die unteren 12 m. Es trennte also eine verticale Entfernung von 58 m die Instrumente. Ein Schacht, der mit einer Reihe von 12 Leitern versehen war, führte von der einen zu der anderen.

Der geschickte Mechaniker Holmes hatte die Trompeten angefertigt und sie waren stets unter seiner eigenen Aufsicht. Sie waren vertical auf dem Be-

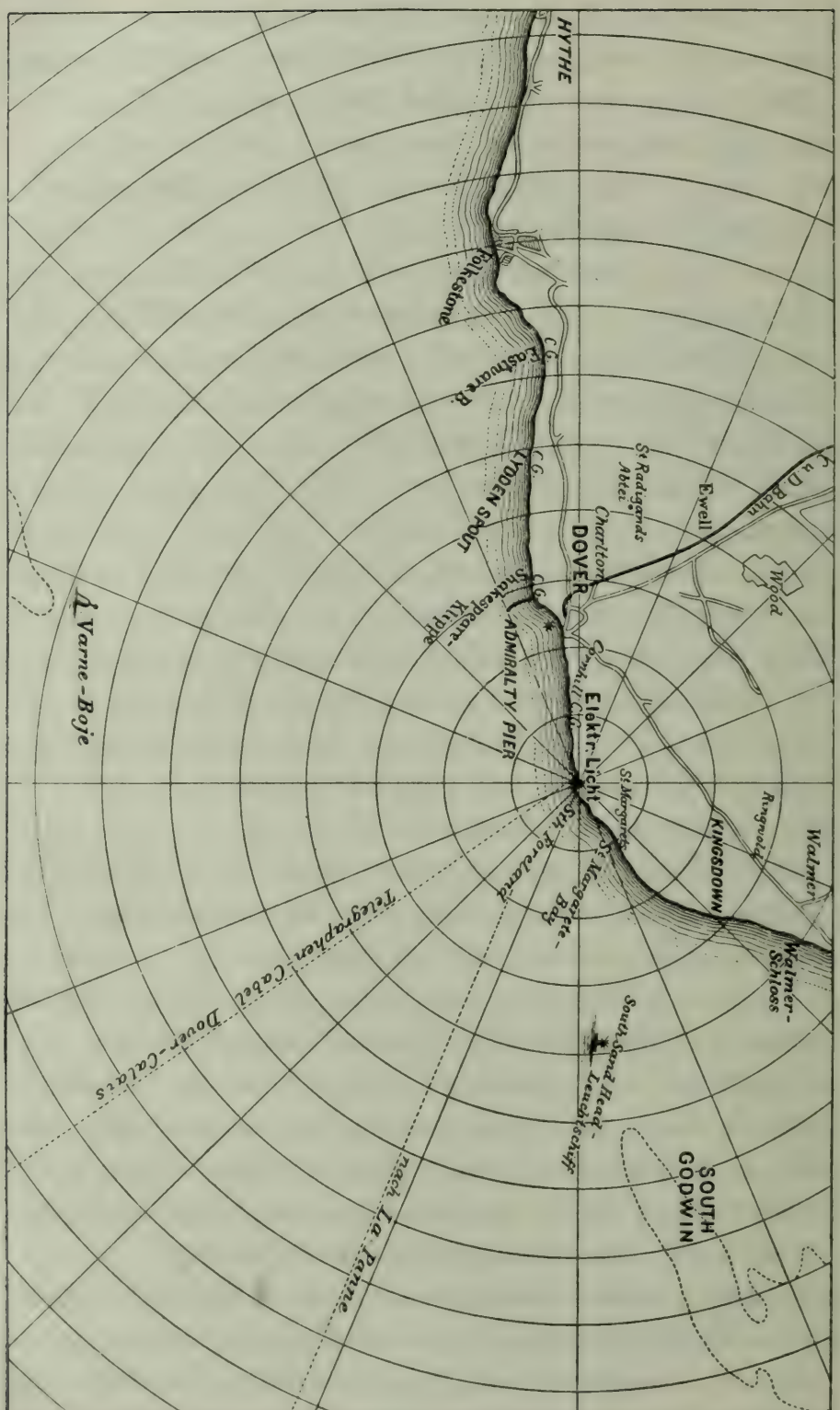

HYTHE
Folkestone
C.G.
Eastware B.
LYDDEN SPOUT
C.G.
Shakespeare-Kluppe
ADMIRALTY PIER
Corrhill C.G.
Elektr. Licht
St Margarets
St Margarete-Bay
Sth Foreland
Telegraphen-Cabel Dover-Calais
nach La Panne
Varne-Boje
DOVER
Charlton
St Radigands Abtei
Ewell
C u D Bahn
Wood
KINGSDOWN
Ringwold
Walmer
Walmer-Schloss
South Sand Head-Leuchtschiff
SOUTH GODWIN

Fig. 155.

hälter der comprimirten Luft angebracht; aber ungefähr 0,6 m vor ihrem Ende waren sie in einem rechten Winkel gebogen, so dass sie ihre Mundstücke der See zukehrten. Es war die Absicht des Verfertigers, den Schall gleichmässig über einen Bogen von 180° zu verbreiten. Um dieses zu erreichen, stellte er die horizontalen Theile der Axen der Hörner im rechten Winkel gegen einander, dann zeigte das eine S S W und das andere O S O, man nahm an, dass jedes Horn einen Bogen von 90° umfasste.

Die 30 cm Dampfpfeife hatte Baily in Manchester construirt.

Unsere ersten Versuche mit diesen Instrumenten bildeten mehr eine Schulung als eine organisirte Untersuchung. Am 19. Mai dampften wir um das Foreland herum und in die See hinaus in den Axen der Hörner. Die Maximalentfernung, die der Schall erreichte, betrug etwa 4,80 km. Indess war der Wind heftig und die See unruhig, so dass locale Geräusche zum grossen Theil unsere Schätzung des Schalls störten.

Die Matrosen drücken die Kraft des Windes durch eine Reihe von Zahlen aus, von 0 = Windstille bis 12 = Sturm, die durch etwas Uebung gewöhnlich eine merkwürdige Uebereinstimmung zwischen verschiedenen Beobachtern in Betreff der Stärke des Windes ergeben. Seine Stärke am 19. Mai war 6 und halbwegs zwischen den Axen der beiden Trompeten blies er im rechten Winkel zur Richtung des Schalls.

Am 20. Mai bedeckten dieselben Instrumente ein grösseres Bereich; aber kein bedeutend grösseres, obgleich die Störung durch die localen Geräusche fehlte. Die Hörner wurden kaum in der Entfernung von 6,40 km in der Richtung ihrer Axen gehört, obgleich zur

Zeit die Luft ruhig, die See glatt und alle anderen Umstände so waren, wie man sie bis dahin als besonders günstig für die Uebertragung des Schalls angesehen hatte. Wir gingen etwas weiter fort, und mit gespanntester Aufmerksamkeit konnten wir in Zwischenräumen in der Entfernung von 9,6 km die Hörner ganz schwach hören. Wir hielten noch einmal etwas weiter an; aber obgleich jedes andere locale Geräusch verstummt war und wir gespannt hinhorchten, hörten wir doch nichts.

Wir hatten mit besonderer Ueberlegung diese Stellung gewählt, die jenseits des Bereiches der Pfeifen und Trompeten lag, in dem Gedanken, dass wir einen entscheidend vergleichenden Versuch zwischen Hörnern und Geschützen als Instrumenten für Nebelsignale machen könnten. Der deutliche Widerhall der in Dover am 19. um 12 Uhr Mittag abgefeuerten Kanone verführte uns zu diesem Vergleich und durch die entgegenkommende Liebenswürdigkeit von General A. Horsford konnten wir ihn gleich ausführen. Punkt $12^1/_2$ Uhr wurde der Rauch eines 18 Pfünder mit einer dreipfündigen Ladung in Dover Castle gesehen, das noch ungefähr 1,6 km weiter als South Foreland liegt. Der laute Widerhall des Geschützes wurde 36 Secunden später gehört, und so wurde allem Anscheine nach seine vollkommene Ueberlegenheit über die Trompeten bewiesen. Wir bestätigten diese Beobachtuug, indem wir bis zu einer Entfernung von 13 km herausdampften, wo wir Alle den Widerhall eines zweiten Geschützes hörten. In einer Entfernung von 16 km wurde der Widerhall eines dritten Geschützes von Einigen von uns gehört und bei 15 km hörten wir Alle den Widerhall eines vierten Geschützes.

Der Erfolg erschien durchaus entscheidend. Bei Anwendung des Gesetzes des umgekehrten Quadrats musste der Schall des Geschützes bei einer Entfernung von 9,6 km vom Foreland ungefähr die dreifache Intensität des Schalls der Trompeten gehabt haben. Man hätte nicht übereilt gehandelt, wenn man unter diesen Verhältnissen dem Geschütz den Vorrang als Nebelsignal zuerkannt hätte. Kein einziger Versuch ist meines Wissens bis jetzt aufgezeichnet worden, der bewiesen hätte, dass, wenn der Schall einer Schallquelle einmal auf einer grösseren Entfernung, als der einer anderen gehört worden ist, dies nicht immer gewesen wäre, oder dass die Atmosphäre an verschiedenen Tagen für verschiedene Schallarten sich günstiger gezeigt hätte. Es zeigte sich indess bei mehreren späteren Gelegenheiten, dass der Schall des Hornes dem des Geschützes bedeutend überlegen war. Diese auswählende Kraft der Atmosphäre enthüllte sich noch auffallender bei Versuchen im Herbst als bei denen im Sommer; und sie erwies sich oft als solche im Zwischenraum von einigen Stunden desselben Tages: von zwei Schallen *A* und *B* zum Beispiel, verbreitete *A* sich am weitesten um 10 Uhr Morgens und *B* um 2 Uhr Nachmittags.

Die Ueberlegenheit der Trompeten über die Pfeifen entschied sich bei den Versuchen am 19. und 20. Mai, und thatsächlich erhielt sich diese Ueberlegenheit, mit wenigen Ausnahmen, während der ganzen Untersuchungszeit. Doch gab es Ausnahmen. Zum Beispiel erreichte einige Male am 2. Juni die Wirkung des Schalls der Pfeifen diejenige der Hörner und übertraf sie sogar. Der Schall wurde von Tag zu Tag verändert. An dem letztgenannten Tage wurde erst ein einzelnes Horn geblasen, dann zwei und drei zusammen; aber die weiteste

Ausbreitung des stärksten Schalls, selbst wenn die Räder des Dampfschiffes angehalten waren, überstieg nicht 9,6 km. Die Axen der Hörner wurden am 2. Juni, um ihre Kraft zu concentriren, in dieselbe Richtung gelenkt und dies war bei allen folgenden Versuchen, wenn nicht das Gegentheil gesagt wird, der Fall.

Am 3. Juni wurden die schon besprochenen drei Geschütze dauernd auf dem South Foreland aufgestellt. Kanoniere von Dover Castle bedienten sie.

Zu einer bestimmten Stunde desselben Tages bedeckten dicke Wolken den ganzen Himmel, einige waren besonders schwarz und drohend, aber in der Durchlässigkeit der Luft zeigte sich eine bedeutende Zunahme. Die Hornsignale wurden in einer Entfernung von 9,6 km noch nicht ganz von dem Geräusch der Räder übertönt; bei 12,8 km wurden die Pfeifen gehört und die Hörner noch besser; während bei 14,4 km, wo die Räder gestoppt waren, die Hornsignale allein deutlich hörbar waren. Jetzt wurde ein merkwürdiges und lehrreiches Phänomen beobachtet. Ueber uns strich ein sturmartiger Regenschauer rasch hinweg, den man bis dahin als einen mächtigen Schalldämpfer angesehen hatte. Ich konnte jedoch keine Abnahme der Intensität beobachten, als der Regenschauer vorbei strich. Es ist sogar wahrscheinlich, dass, wäre ich vorurtheilsfrei gewesen, ich eine Verstärkung des Schalls bemerkt haben würde, wie sie bei verschiedenen anderen Gelegenheiten sehr entschieden während heftiger Regen eintrat.

Wir versuchten am 3. Juni den Einfluss von „Schlägen“, indem die Hörner ein wenig aus dem Einklang gebracht wurden; obgleich nun aber die Schläge den Schall charakteristisch machten, schienen sie seinen

Umkreis nicht zu erweitern. In einiger Entfernung von der Station wurden eigenthümliche Schwankungen in der Intensität bemerkt. Nicht nur dass die einzelnen Schläge in Stärke schwankten, es wurden sogar plötzliche Anschwellungen und Abschwächungen bei demselben Anblasen beobachtet. Dies kam nicht von irgend einer Abänderung an den Instrumenten, sondern nur von der Veränderung des Mediums, das der Schall durchkreuzte.

Während der Untersuchungen wurden verschiedene Veränderungen an den Hörnern und Pfeifen versucht, um ihre Maximalkraft zu entwickeln. Die Ausbreitung des Schalls unserer besten Hörner betrug am 16. Juni 14 km. Die Geschütze klangen sehr schwach in dieser Entfernung. Dass die Stärke des Schalls von der Form des Geschützes abhängt, wurde durch die Thatsache bewiesen, dass die Haubitze mit einer dreipfündigen Ladung die anderen Geschütze sehr weit übertraf. In der Axe der Hörner hat der Schall seine grösste Stärke, er wird allmählich schwächer, wenn der Winkelabstand von der Axe vermehrt wird [1]). Die Pfeifen haben keine solche Axen und senden ihre Schallwellen mit gleicher Stärke nach allen Richtungen hin aus. Die Pfeifen waren daher den Hörnern oft mehr als ebenbürtig, wenn die Hörner seewärts zeigten, nahe an der Linie, die auf der einen Seite das Foreland und das South Land Head Leuchtschiff und auf der anderen das Foreland und den Admiralty Pier mit einander verband.

---

[1]) Wenn wir später den Schall in der verlängerten Axe eines Geschützes mit der Intensität im rechten Winkel zur Axe verglichen, so war der Unterschied, wenn auch bemerkbar, doch sehr klein. Dies stimmt mit früheren Beobachtungen überein. Die Schallwellen sind rings um das Geschütz von der gleichen Intensität.

§. 4. Einfluss des Schallschattens.

Wir beobachteten am 19. Mai eine Erscheinung, die für die Aufstellung der Nebelsignale von sehr grosser Wichtigkeit ist. Ich meine die schnelle Abnahme der Intensität auf beiden Seiten der Signalstation auf South Foreland. Wir hielten zwischen der Station und dem South Land Head Leuchtschiff in einer Entfernung von 4 km von der Station. Die Trompeten und Pfeifen wurden geblasen, blieben aber ganz unhörbar. Wir näherten uns; aber selbst bei 1,6 km Entfernung, und die Instrumente vollkommen in Sicht, erreichte uns ihr Schall nicht. Hier stand ein leichter Wind dem Schall entgegen. Der Signalstation gegenüber erklangen die Trompeten sehr mächtig; aber während wir uns der Linie näherten, die das Foreland mit dem Ende des Admiralty Pier verbindet, nahm der Schall rasch ab, obgleich der Wind hier dem Schall günstig war. Es musste daher eine andere Ursache als der Wind gefunden werden, um diese Erscheinung zu erklären.

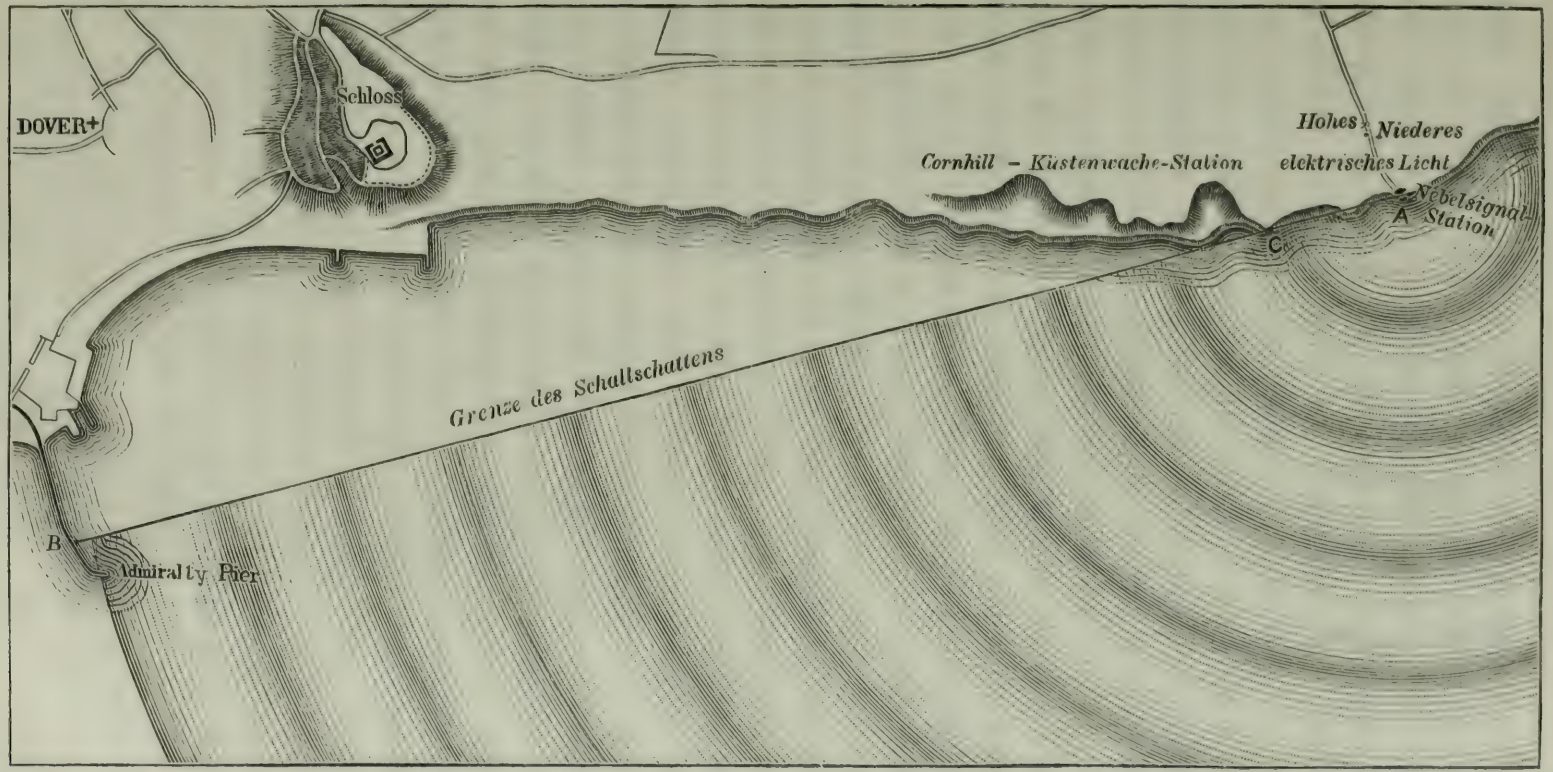
Am 10. Juni beobachteten wir dieselbe Erscheinung. Nach vollendetem Tagewerk dampften wir am Foreland vorbei, nach dem Ende des Piers. In einer Entfernung von 1,6 km vom Foreland wurde der Schall mit solcher Geschwindigkeit schwächer, dass ich glaubte, es müsse etwas an den Pfeifen und Hörnern vorgefallen sein. Glücklicherweise waren die Geschütze noch da, um diese Vermuthung zu prüfen. Wir signalisirten nach ihnen in einer Entfernung von 3,2 km. Bei einer Ladung von drei Pfund wurde nichts von ihnen gehört, obgleich ihr Schuss deutlich sichtbar war; bei einer sechspfündigen Ladung wurde der 18 Pfünder

kaum gehört; die Haubitze wurde etwas besser gehört, während der Mörser vollständig unhörbar war. Es konnten daher keine Eigenthümlichkeiten der Hörner oder Pfeifen diese Erscheinung erklären.

Am 11. Juni trat diese Wirkung ebenso klar zu Tage. Auf der Linie, die das Foreland und das Ende des Admiralty Pier verbindet, 1,2 km von der Station, nahm der Schall allmählich schnell ab und wurde bald darauf unhörbar. In der Entfernung von 2 km signalisirten wir den Geschützen; der Ton war jedesmal ein schwacher, unbestimmter Klang. Es steht fest, dass es unter allen Umständen durchaus nothwendig für Nebelsignale ist, dass sie in einer Entfernung von 6,4 km gehört werden. Als diese Untersuchung begann, war zweifellos der Schuss der Kanone das Signal der grössten Ausbreitung des Schalls und doch finden wir hier, dass Bedingungen vorhanden sein können, die selbst das Geschütz bei weniger als der Hälfte der als nothwendig erkannten Entfernung unwirksam machen.

Die Zeichnung (Fig. 156), welche aus einem vergrösserten Theil von Fig. 155 besteht, hilft uns zu einer Erklärung dieser Beobachtungen. Eine vorspringende Kalkklippe C, nahe der Nebelsignalstation, nahm den Stoss der Schallwellen auf und verstreute sie durch Reflexion. Der ganze Seeraum zwischen der Linie AB und den Klippen unter Dover Castle war im Schallschatten. In dieser Linie konnten die Instrumente nicht gesehen werden, ausserhalb derselben konnten sie es; so müssen wir zur Erklärung der Thatsache annehmen, dass die Abschwächung des Schalls nicht nur innerhalb, sondern unmittelbar ausserhalb der Grenze eintrat, während die Instrumente noch in Sicht waren. Eine plötzliche Abnahme des Schalls wurde jedesmal beob-

Fig. 156.


DOVER
Schloss
Cornhill – Küstenwache-Station
Hohes
Niederes
elektrisches Licht
Nebelsignal
Station
A
C
Grenze des Schallschattens
B
Admiralty Pier

achtet, wenn man die Grenze AB nach dem Strand zu kreuzte, und eine entsprechend plötzliche Zunahme beim Kreuzen nach der See zu. Es hörte aber der Schall beim Eintritt in den Schatten niemals vollständig auf. Den ganzen beschatteten Raum erfüllte ein geschwächter Ton, der zum grossen Theil durch die Divergenz in dem Schatten der Wellen erzeugt wurde, die gegen die Grenze stiessen. Durch diese Divergenz wurde die Intensität der directen Wellen vermindert, da die Theile, die dem Schatten am nächsten waren, am meisten litten.

Auf der Karte sind die Verdichtungen und Verdünnungen der directen Wellen durch kreisförmige Linien von verschiedenem Abstand angegeben. So haben wir hier eine Ursache für die Abnahme des Schalls in der Nähe des akustischen Schattens gefunden. Eine andere Ursache mag in der Interferenz[1]) der directen Wellen mit denjenigen liegen, die von C und von anderen Theilen der Klippen reflectirt werden. Diese Betrachtungen, die sich auf den Schallschatten westlich von Foreland beziehen, lassen sich auch für den auf der anderen Seite anwenden.

Am 25. Juni wurde eine allmähliche Zunahme der Durchlässigkeit der Luft für den Schall vom Morgen zum Abend beobachtet; doch war die maximale Ausbreitung überhaupt nur mässig. Die Schwankungen in der Stärke des Schalls waren auffallend, er sank bisweilen bis zur Unhörbarkeit und stieg dann wieder bis zu grossem Lärm. Man beobachtet oft bei Kirchenglocken eine gleiche Erscheinung, die von der gleichen Ursache herrührt. Am 26. Juni hatte die akustische Durchlässigkeit der

[1]) Die Gesetze der Interferenz sind in der achten Vorlesung auseinandergesetzt.

Luft noch mehr zugenommen: in einer Entfernung von 15 km von der Station wurden die Pfeifen und Hörner deutlich trotz eines Gegenwindes von der Stärke 4 gehört; während am 25. Juni bei günstigem Wind die maximale Ausbreitung nur 10,4 km betrug. Es muss daher sicher die Ausbreitung des Schalls von etwas anderem als vom Wind abhängen.

Am Dienstag, den 1. Juli, wurden Beobachtungen über die Abnahme des Schalls in verschieden gegen die Axe des Hornes geneigten Richtungen angestellt. Wie man erwarten konnte, war der Schall in der Axe am lautesten, die Abnahme auf beiden Seiten allmählich. Der Tag war akustisch klar. In einer Entfernung von 16 km gab das Horn einen deutlichen Ton, während die amerikanische Pfeife das Horn zu übertreffen schien. Ein dichter Nebel verbarg das Foreland um diese Zeit. Bei 16,8 km hörten wir hin und wieder Hornstösse, aber nach einiger Zeit war jeder Schall verstummt; es schien, als ob die Luft, nachdem sie erst so ausserordentlich durchlässig gewesen war, allmählich undurchdringlich für den Schall geworden wäre.

Um 4 Uhr 45 Minuten Nachmittags nahmen wir den Aufseher des Leuchtschiffes von Varne an Bord der „Irene“. Er und seine Mannschaft hatten den Tag über den Schall mit Unterbrechungen gehört, obgleich das Leuchtschiff ganz gegen den Wind lag und 20,4 km von der Quelle des Schalls entfernt war.

Wir können hier wohl füglich einige Betrachtungen über unsere Beobachtungen einfügen. Es wird, wie schon erwähnt, allgemein angenommen, dass die Schallwellen an den Oberflächen der winzig kleinen Theilchen reflectirt werden, aus denen Dunst und Nebel bestehen, und man erklärt so die erwähnte Abnahme

des Schalls im Nebel. Ist dies indess eine wirksame und bemerkbare Ursache für das Aufhalten des Schalls, und ist klare, ruhige Luft der beste Träger, so kann man nicht verstehen, wie heute, im dicken Nebel, der Schall eine Entfernung von 20,4 km erreichte, während am 10. Mai, bei einer ruhigen, dunstfreien Atmosphäre, der maximale Umkreis nur 8 bis 9,6 km betrug. Solche Thatsachen lassen uns eine Aenderung in unseren Ansichten über die Wirkung von Dunst und Nebel auf den Schall voraussehen, die, wie sich bald ergeben wird, eine vollständige ist.

Eine Zwischenzeit von 12 Stunden genügte, um die akustische Durchlässigkeit der Luft in der überraschendsten Weise zu verändern. Am 1. Juli hatte der Schall eine Ausbreitung von fast 20,4 km, am 2. überstieg die Ausbreitung nicht 6,4 km.

§. 5. Widersprechende Resultate.

So weit war die Untersuchung vorgeschritten, ohne dass wir auch nur die Spur eines Gesetzes gefunden hätten, das die widersprechenden Resultate verbunden hätte. Die Entfernung erreichte beim Schall am 19. Mai 5,6 km, am 20. 8,8 km, am 2. Juni 9,6 km, am 3. mehr als 14,4 km, am 10. waren es ebenso 14,4 km, am 25. verminderte sie sich bis auf 10,4 km, dann stieg sie am 26. wieder auf 14,8 km; am 1. Juli stieg sie, wie wir eben gesehen haben, auf 20,4 km, um am 2. wieder auf 6,4 km zu sinken. Keine der zur Zeit beobachteten meteorologischen Erscheinungen konnte als die Ursache dieser Schwankungen angesehen werden. Der Wind übt eine anerkannte Wirkung auf den Schall aus, aber er konnte nicht für alle diese Erscheinungen verantwortlich gemacht

werden. Am 25. Juni z. B., als der Umkreis nur 10,4 km betrug, war der Wind günstig; am 26., als der Umkreis 14,8 km überstieg, war er dem Schall entgegen. Auch die wechselnde optische Durchsichtigkeit der Atmosphäre konnte nicht als Erklärung genügen, denn am 1. Juli, als der Umkreis 20,4 km betrug, verhüllte ein dichter Dunst die weissen Klippen vom Foreland, während an vielen anderen Tagen, an denen die akustische Ausbreitung nicht halb so gross war, die Atmosphäre optisch klar war. Bis zum 3. Juli blieb Alles räthselhaft, aber an diesem Tage wurden Beobachtungen gemacht, die, wie es mir schien, Vermuthungen und Zweifel durch das helle Licht der physikalischen Erklärung beseitigten.

§. 6. Vorgeschlagene Lösung der Widersprüche.

Am 3. Juli dampften wir zunächst an einen Punkt 4,7 km S.W. von der Signalstation. Kein Ton, nicht einmal die Geschütze wurden in dieser Entfernung gehört. 3,2 km entfernt waren sie ebenfalls unhörbar. Dies war aber eine Stellung, an welcher der Schall, obgleich er in der Axe des Hornes stark war, doch jedes Mal abnahm, und so dampften wir genau an die Stelle, an welcher wir am 1. Juli unsere Beobachtungen gemacht hatten. Um 2 Uhr 15 Minuten Nachmittags, 6 km von der Station entfernt, wurden bei klarer, ruhiger Luft und stiller See die Hörner und Pfeifen (amerikanische) angeblasen, sie waren aber unhörbar. Von diesem Erfolge überrascht, signalisirten wir nach den Geschützen. Sie wurden alle abgefeuert, aber, obgleich uns der Rauch ganz nahe schien, erreichte uns kein Ton. Am 1. Juli betrug in dieser Richtung der beobachtete Umkreis der Hörner und der Geschütze 16,8 km, während er in der

Richtung des Leuchtschiffes von Varne fast 20,8 km war. Wir dampften näher bis zur Entfernung von 4,8 km, hielten an und horchten mit grösster Aufmerksamkeit, aber weder Horn noch Pfeife konnten gehört werden. Wir signalisirten wieder nach den Geschützen; fünf von ihnen wurden nach einander abgefeuert, aber nicht eines von ihnen gehört. Wir dampften weiter in derselben Richtung bis zu 3,2 km und liessen die Geschütze direct auf uns abfeuern. Die Haubitze und der Mörser gaben bei einer dreipfündigen Ladung einen schwachen Ton, während der Achtzehnpfünder ganz unhörbar blieb. Nach dem Gesetze des umgekehrten Quadrates müsste der Schall, bei weit ungünstigeren Verhältnissen der Luft und der See, nach der angenommenen Meinung in 3,2 km Entfernung am 1. Juli mehr als 40 Mal die Intensität gehabt haben, die er bei derselben Entfernung um 3 Uhr Nachmittags am 3. Juli hatte.

„Auf stillem Wasser", sagt Sir John Herschel, „verbreitet sich der Schall mit merkwürdiger Deutlichkeit und Stärke." Diese Bedingung war da, und so wurde es uns schwer, da das Foreland uns so nahe, die See so glatt und die Luft so durchsichtig war, uns klar zu machen, dass die Geschütze abgefeuert oder die Trompeten geblasen worden waren. Welches konnte die Ursache sein?

Der Schwefel ist in homogenen Krystallen ausserordentlich durchlässig für strahlende Wärme, während der gewöhnliche Schwefel im Handel sehr undurchdringlich für sie ist. Der Grund ist, dass der Schwefel nicht die moleculare Continuität des Krystalles besitzt, sondern nur aus einem Aggregat kleiner Körner besteht, die nicht in vollkommenem optischen Contact mit einander sind. Wo dies der Fall ist, wird immer ein Theil

der Wärme beim Eintritt in das Korn und beim Austritt aus demselben reflectirt; wenn die Körner klein und zahlreich sind, wiederholt sich diese Reflexion so oft, dass die Wärme vollständig aufgebraucht ist, ehe sie irgendwie tiefer in die Substanz eindringen kann. Dieselbe Beobachtung macht man bei Schnee, Rauch, Wolken und gewöhnlichem Salz, überhaupt bei allen durchsichtigen Substanzen in Pulverform; sie sind alle für das Licht undurchlässig, nicht in Folge der Absorption des Lichtes, sondern in Folge der wiederholten inneren Reflexion.

Es ist bekannt, dass Humboldt bei seinen Beobachtungen an den Fällen des Orinoko diese Gesetze auf den Schall angewendet hat. Er fand das Geräusch der Fälle bei Nacht viel lauter als am Tage, obgleich in diesen Regionen die Nacht weit geräuschvoller ist, als der Tag. Die Ebene zwischen ihm und den Fällen bestand aus Grasflächen und Felsstücken. Er fand die Temperatur der Felsen in der Tageshitze weit höher als die der Grasflächen. Er schloss daraus, dass sich über jedem erhitzten Felsen eine Säule von durch die Wärme verdünnter Luft erhöbe, deren Stelle durch das Herabsinken der schwereren Luft wieder ersetzt wurde. Er schrieb das Absterben des Schalls den Reflexionen zu, die an den Grenzflächen der verdünnten und dichteren Luft einträten. Durch diese wissenschaftliche Erklärung wurde allgemein bekannt, dass eine nicht homogene Atmosphäre für die Uebertragung des Schalls unvortheilhaft sei.

Aber was konnte am 3. Juli, bei einer nicht verschieden erhitzten Ebene, sondern bei einer ruhigen See als Basis der Atmosphäre, ihre Homogenität so zerstören, dass es ihr möglich war, in einer so geringen Entfernung

eine so gewaltige Menge von Schall zu ersticken? Mein Gedankengang war zu der Zeit folgender: Als ich, diese Frage überlegend, auf dem Deck der „Irene“ stand, wurde ich mir der ausserordentlichen Kraft der Sonne bewusst, die auf meinen Rücken brannte und die Gegenstände in meiner Nähe erhitzte. Strahlen von gleicher Mächtigkeit fielen auf die See und müssen dort eine reichliche Ausdünstung erzeugt haben. Dass der so gebildete Dampf beim Aufsteigen sich so mit der Luft mischte, dass ein absolut homogenes Medium entstand, war höchst unwahrscheinlich. Er würde sicher, dachte ich, in unsichtbaren Strömen aufsteigen, durch die darüberliegende Luft einmal an einem Punkte, dann an einem anderen hindurchtreten, und die Luft auf diese Weise durch Kräuselungen und Streifen flockig machen. Wir würden dann an deren Grenzflächen die nothwendigen Bedingungen haben, um partielle Echos und den nothwendig darauf folgenden Verlust an Schall zu erzeugen. Luftströmungen von verschiedener Temperatur konnten auch, so weit sie bestanden, mit zu dieser Wirkung beitragen.

Die Bedingungen, unter denen es möglich war, diese Erklärung zu prüfen, traten alsbald ein. Um 3 Uhr 15 Minuten Nachmittags trat eine einzelne Wolke vor die Sonne und beschattete den ganzen Raum zwischen uns und South Foreland. Die Erwärmung des Wassers und die Erzeugung von Dampf und Luftströmen wurde durch das Zwischentreten dieses Schirmes verhindert; daher die Wahrscheinlichkeit von plötzlich vermehrter Durchlässigkeit. Um diese Vermuthung zu prüfen, wurde der Dampfer augenblicklich gedreht und wir fuhren rasch zu unserer letzten Stelle der Unhörbarkeit zurück. Die Töne wurden, wie ich erwartet hatte, deutlich, wenn

auch schwach gehört. Wir waren in einer Entfernung von 4,8 km. Bei 6 km wurden die Geschütze abgefeuert, beide geradeaus und nach oben. Ein sehr schwacher Klang war Alles, was wir hörten; wir hörten aber einen Klang, wo wir früher nichts gehört hatten, weder hier, noch 1,2 km näher. Wir dampften bis 6,8 km weiter hinaus, wo die Töne einen Moment schwach gehört wurden; aber sie schwanden, als wir warteten, und obgleich die grösste Ruhe an Bord herrschte und die See ohne die leichteste Kräuselung war, konnten wir nichts hören. Wir sahen deutlich die Dampfstösse, die den Anfang und das Ende einer Reihe von Trompetenstössen anzeigten, aber die Stösse selbst waren vollkommen unhörbar.

Es war jetzt 4 Uhr Nachmittags, es war erst meine Absicht, in dieser Entfernung, die ausserhalb des Schallbereiches, aber nicht zu weit ab lag, zu halten, um zu sehen, ob nicht das Sinken der Sonne der Atmosphäre die Kraft wiedergeben würde, den Schall durchzulassen. Nachdem wir eine Weile gewartet hatten, wurde das Herablassen eines Bootes vorgeschlagen, um das Dampfschiff für andere Arbeit frei zu machen, und obgleich ich nur ungern das erwartete Wiedererwachen des Schalls aufgab, stimmte ich doch dem Vorschlage bei. Zwei Männer wurden in das Boot gesetzt und beauftragt, alle Aufmerksamkeit anzuwenden, um wo möglich den Schall zu hören. Sie hörten nichts, trotz der vollkommenen Stille um sie herum. Sie wurden dann angewiesen, eine Flagge aufzuhissen, wenn sie die Töne hören würden, und sie aufgehisst zu lassen, so lange die Töne andauerten.

Um 4 Uhr 45 Minuten verliessen wir sie und steuerten nach dem South Land Head Leuchtschiff. Genau 15 Minuten nachdem wir uns getrennt hatten, wurde

die Flagge gehisst; endlich war es dem Schall gelungen, die Luftmasse zwischen dem Boote und dem Ufer zu durchdringen. Wir hörten bei unserer Rückkunft natürlich die Töne auch.

Wir setzten die Prüfung noch weiter fort, indem wir weiter hinaus dampften. 9,2 km entfernt hielten wir und hörten die Töne; bei 9,6 km hörten wir sie deutlich, aber so schwach, dass wir dachten, wir hätten die Grenze des Schallbereiches erreicht; während wir aber warteten, gewannen die Töne an Kraft. Wir steuerten nach der Varne Boje, welche 12,4 km von der Signalstation entfernt ist und hörten die Töne dort besser, als in der Entfernung von 9,6 km. Wir setzten unseren Curs noch bis 16 km fort, hielten dort für kurze Zeit, hörten aber nichts mehr.

Als wir indess weiter nach dem Varne Leuchtschiff steuerten, das an dem anderen Ende des Varne-Strandes liegt, riefen wir den Wächter an und hörten von ihm, dass bis 5 Uhr Nachmittags nichts gehört worden wäre, dass aber von der Stunde an der Schall angefangen habe, hörbar zu werden. Er beschrieb einen der Töne als „sehr gewaltig, dem Brüllen eines Stieres vergleichbar", was sehr passend den Ton der grossen amerikanischen Dampfpfeife charakterisirt. So waren also die Töne gegen Ende des Tages auf dem Leuchtschiff von Varne gehört worden, obgleich es 20,4 km von der Signalstation entfernt ist. Ich halte es für wahrscheinlich, dass an einem Punkte, der 3,2 km vom Foreland entfernt ist, der Schall um 5 Uhr Nachmittags 50 Mal mehr Intensität hatte, als um 2 Uhr Nachmittags. Solchen ungeahnten Schwankungen ist die Atmosphäre unterworfen. Bei unserer Rückfahrt nach Dover Bay um 10 Uhr Nachmittags hörten wir den Schall nicht nur

deutlich, sondern laut an den Stellen, wo wir am Morgen nichts gehört hatten.

§. 7. Echos von unsichtbaren akustischen Wolken.

Ist die Erklärung des Phänomens aber richtig, so muss eine ihm entsprechende andere existiren, die wir jetzt untersuchen müssen. Es hat sich gezeigt, dass an einem stillen Tage eine Luftschicht von weniger als 4,8 km Dicke fähig ist, sowohl die Kanonade, als auch die Hornsignale vom South Foreland zu ersticken; nach der vorher gegebenen Erklärung erfolgte dieses Resultat durch die Reflexion des Schalls durch unsichtbare akustische Wolken, die die Atmosphäre an einem Tage von vollkommen optischer Durchsichtigkeit erfüllten. Aber, ist dies richtig, so ist es unglaublich, dass eine so grosse Schallmasse gänzlich in einer so kurzen Entfernung verschwinden solle, ohne dass irgend eine Spur von ihr übrig bliebe. Nehmen wir an, dass wir, statt uns hinter die akustische Wolke zu stellen, uns vor sie stellten, könnten wir nicht, nach dem Gesetze der Erhaltung der Kraft, erwarten, dass wir durch Reflexion den Schall erhielten, der uns beim Durchgang nicht erreichen konnte? Es würde dann der Fall genau analog der Reflexion des Lichtes von einer gewöhnlichen Wolke für den Beobachter sein, der zwischen ihr und der Sonne stände.

Es war meine erste Sorge bei Beginn des betreffenden Tages, mich zu überzeugen, dass unsere Unfähigkeit, den Schall zu hören, nicht von irgend einer Störung an den Instrumenten am Lande herrühre. In Begleitung von Herrn Price Edwards liess ich mich um 1 Uhr Nachmittags an das Ufer rudern und landete am Fusse der

South Foreland Klippe. Die Luftmasse, die sich schon so ausserordentlich befähigt gezeigt hatte, den Schall aufzuhalten, und die diese Kraft noch deutlicher später am Tage zeigte, war jetzt vor uns. Auf sie schlugen die Schallwellen auf und wurden mit erstaunlicher Intensität zurückgeworfen. Die Instrumente, dem Auge verborgen, waren auf der Höhe der Klippe 82,25 m über uns, die See war still und frei von Schiffen, die Atmosphäre ohne Wolke und kein Gegenstand in Sicht, der möglicher Weise die beobachtete Wirkung ausüben konnte. Die Echos kamen aus der vollkommen durchsichtigen Luft scheinbar nur wenig schwächer als der directe Schall, und starben dann langsam ab. Eine Bemerkung, die mein Gefährte damals in seinem Notizbuche machte, zeigte, wie tief das Phänomen ihn berührte: „Wollte man nicht sagen, dass die Echos von der Fläche des Oceans zu kommen schienen, so schien es nicht möglich, einen bestimmteren Punkt für die Reflexion anzugeben.“ Und in der That war kein solcher Punkt zu sehen; die Echos trafen uns wie durch Zauberkraft aus den unsichtbaren akustischen Wolken, die die optisch durchsichtige Atmosphäre erfüllten. Dass solche Wolken bei allen Witterungen existiren, seien sie optisch wolkig oder klar, ist eine der wichtigsten Thatsachen, die durch diese Versuche festgestellt wurde.

Wir haben hier, meiner Meinung nach, den Schlüssel zu sehr vielen von den Geheimnissen und den widersprechenden Beobachtungen, die uns bei dieser Frage entgegentreten. Die vorhergehenden Beobachtungen zeigen, dass man weder die Wahrhaftigkeit, noch die Geschicklichkeit der widersprechenden Zeugen bezweifeln darf, denn aus dem Wechsel der Atmosphäre erklärten sie sich mehr als genügend. Der bisherige Irrthum lag nicht darin, dass

man ungenau berichtete, sondern dass man die scheinbar einförmige Arbeit vernachlässigte, die Beobachtungen während einer genügend langen Zeit zu wiederholen. Ich werde später Gelegenheit haben, auf den Schaden hinzuweisen, der eintreten kann, wenn man Seefahrern Anweisungen giebt, die auf so unsicheren Beobachtungen beruhen.

Es bedurfte indess langer Ueberlegungen und wiederholter Beobachtungen, ehe dieser Schluss feste Wurzeln in mir fasste; denn er widersprach den Resultaten grosser Beobachter und den Bestimmungen berühmter Gelehrter. Während man angenommen hatte, dass Wolkenechos durch die Beobachtung bewiesen seien, hatte man es bis dahin als sicher angesehen, dass hörbare Echos niemals in optisch klarer Luft vorkämen. Wir verdanken diese Ansicht dem sonst ausgezeichneten Bericht von Arago über die Versuche, die auf Mont Montlhéry und Villejuif zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalls gemacht wurden[1]). Arago's Bericht

[1]) Sir John Herschel giebt folgenden Bericht über Arago's Beobachtungen: „Man hat das Rollen des Donners dem Echo in den Wolken zugeschrieben, und wenn man annimmt, dass eine Wolke eine Ansammlung von Wassertheilchen ist, die, wenn auch noch so klein, in flüssigem Zustande sind und von denen jedes daher für sich befähigt ist, Schall zu reflectiren, so liegt kein Grund vor, warum nicht lauter Schall diffus (wie helles Licht) aus einer Wolke zurückgeworfen werden könnte. Und dass dies der Fall ist, hat sich durch directe Beobachtung an dem Schalle der Kanonen erwiesen. Die Herren Arago, Matthieu und Prony beobachteten bei ihren Versuchen über die Geschwindigkeit des Schalls, dass bei vollkommen klarem Himmel die Explosionen ihrer Geschütze immer einzeln und scharf waren; während, wenn der Himmel bedeckt war, und selbst, wenn nur eine Wolke über einen beträchtlichen Theil des Horizontes in Sicht kam, sie oft von einem lange anhaltenden Rollen, wie Donner, begleitet waren.“ — Essay on Sound pag. 38. Die fernen Wolken würden ein langes Intervall zwischen Schall und Echo voraussetzen, doch wird nichts der Art erwähnt.

über die von ihm und seinen Collegen gemachten Beobachtungen über das Phänomen lautet wie folgt: „Wir wollen noch, ehe wir diesen Bericht schliessen, hinzufügen, dass die bei Montlhéry abgefeuerten Schüsse von einem Rollen gleich dem des Donners begleitet waren, das etwa 20 bis 25 Secunden andauerte. Nichts der Art ereignete sich bei Villejuif. Einmal hörten wir zwei deutliche, durch eine Secunde getrennte Schüsse von der Kanone von Montlhéry. In zwei anderen Fällen folgte der Entladung desselben Geschützes ein andauerndes Rollen. Nie traten diese Erscheinungen ohne Wolken ein. Bei klarem Himmel waren die Töne einzeln und momentan. Können wir nun nicht daraus schliessen, dass das vielfache Ertönen der Kanonen von Montlhéry, das man in Villejuif hörte, Echos in den Wolken seien, und können wir diese Thatsache nicht als günstig für die Erklärung gewisser Physiker für das Rollen des Donners annehmen?“

Meine Antwort auf diese Frage würde einfach „Nein“ lauten. Hunderte von Kanonenschüssen wurden am South Foreland abgefeuert, viele, wenn der Himmel ganz frei von Wolken war, und nicht ein einziges Mal fehlte ein ähnliches Rollen, wie das von Arago beobachtete. Es folgte überdies so plötzlich auf den directen Schall, dass kaum eine bemerkbare Unterbrechung zwischen dem Schall und dem Echo wahrzunehmen war. Dies könnte nicht der Fall sein, wenn die Wolken die Ursache des letzteren gewesen wären. Eine reflectirende Wolke würde in der Entfernung von 1,6 km ein Intervall von fast 10 Secunden zwischen Schall und Echo bedingen, und wäre ein solches Intervall beobachtet worden, so würde sicher von den dort stationirten französischen Gelehrten darüber berichtet worden sein; aber sie haben es nicht erwähnt.

Ich glaube, die angeführte Thatsache wie auch die daraus zu entnehmende Schlussfolgerung erheischen eine nochmalige Betrachtung. Denn unsere Beobachtungen beweisen überzeugend, dass vollkommen durchsichtig erscheinende Luft fähig ist, Echos von grosser Intensität und langer Dauer hervorzurufen. Der Gegenstand verdient eine weitere Erwägung. Am 8. October wurde, wie schon erwähnt, die Sirene auf South Foreland aufgestellt. Ich ging an dem Tage auf die Station und horchte auf ihre Echos. Sie waren weit mächtiger als die des Hornes. Sie waren wie die anderen vollkommen continuirlich und schwanden allmählich, wie in die Ferne dahin. Es schien, als wäre dem directen Schall durch seine Echos ein complicirtes, aus vielen einzelnen Theilen bestehendes Gebilde hinzugefügt worden, das wie von einer Anzahl von Trompetern herrührte, die erst aus der Nähe antworteten und dann sich rasch nach der französischen Küste zurückzogen. Die Echos der Sirene dauerten an diesem Tage 11 Secunden, die des Hornes 8 Secunden.

Besonders war bei der Sirene die Verstärkung des directen Schalls durch sein Echo auffallend. Etwa 1 Secunde nach dem Beginn des Sirenenstosses fiel das Echo wie ein neuer Schall ein. Dieses erste Echo musste daher von einer Luftschicht von nicht mehr als 180 bis 210 m Dicke zurückgeworfen sein. Die wenigen vereinzelten sichtbaren Wolken waren zur Zeit kilometerweit entfernt und konnten augenscheinlich nichts mit der Erscheinung zu thun haben.

Am 10. October war ich wieder am Foreland und horchte auf die Echos, die den eben besprochenen Resultaten glichen. Am 15. hatte ich Gelegenheit, etwas Neues in Dungeness zu bemerken, wo ein ähnliches, aber nicht ganz so mächtiges Horn, wie die auf South Fore-

land, aufgestellt war. Es rotirte automatisch durch einen Bogen von 210°, hielt an vier verschiedenen Punkten des Bogens und stiess einen Ton von 6 Secunden Dauer aus; diese Töne waren durch Intervalle von 20 Secunden von einander getrennt.

Der neue beobachtete Fall war folgender: als das Horn rotirte, wurden die Echos jedes Mal in der Richtung zurückgeworfen, die der Axe des Hornes entsprach. Wenn man entweder hinter oder vor dem Leuchtthurme stand, oder wenn man die Augen schloss, um jede Kenntniss der Stellung des Hornes auszuschliessen, so konnte man immer die Richtung der Axe, wenn es ertönte, aus der Richtung, in welcher die Luftechos den Strand erreichten, erkennen. So wird also die Richtung nicht nur durch den Schall selbst angegeben, sondern sie kann auch aus den Luftechos des Schalls bestimmt werden.

Am 17. October, etwa um 5 Uhr Morgens, als die Luft vollkommen wolkenlos war, ruderten wir nach dem Foreland, landeten und gingen über den Seetang an den Fuss der Klippe. Als ich den Fuss erreichte, lag die „Galatea“ so, dass ein Echo von überraschender Intensität von ihrer Seite zurückgeworfen wurde; es kam wie von einer unabhängigen Schallquelle am Bord des Dampfers. Dies hörte auch plötzlich auf und die Luftechos versanken allmählich in Schweigen.

Eine Reihe von gleichen Beobachtungen am Fusse der Klippe ergab die Dauer der Luftechos der Sirene zu 13 bis 14 Secunden.

Als ich auf den Steinen am Strande unter einem vorspringenden Kalksteindache lag, traf mich der etwas geschwächte, gebeugte Schall, und ich konnte mit grosser Schärfe eine Secunde etwa nach dem Ausklingen des

Sirenenstosses die Echos hören, die mit dem directen Schall zusammentrafen und ihn verstärkten. Am Anfang war das Schallecho sehr kräftig und es kam wie gewöhnlich von einer Luftschicht von 180 bis 210 m Dicke. Bei abermaliger Prüfung fanden wir, dass die Dauer des Echos 14 bis 15 Secunden betrug. Die vollkommene Klarheit des Nachmittags bewog mich, ihn zur Untersuchung des Echos zu wählen. Ich will bemerken, dass an diesem Tage die Echos am längsten und von der grössten akustischen Durchlässigkeit waren; aus dieser Verbindung lässt sich schliessen, dass die Dauer des Echos ein Maass für die atmosphärische Tiefe ist, aus der es kommt. Man darf nicht vergessen, dass an keinem Tage die Atmosphäre frei von unsichtbaren akustischen Wolken war, und an diesem Tage, wo ihre Existenz den directen Schall nicht hinderte, eine Entfernung von 25,6 km zu erreichen, konnten sie uns Echos von 15 Secunden Dauer zusenden.

Bei verschiedenen Gelegenheiten, wenn wir reichlich 4,8 km nördlich vom Foreland vom Ufer waren, wurden uns die Echos der Sirene von der wolkenlosen, südlichen Luft deutlich zurückgesendet.

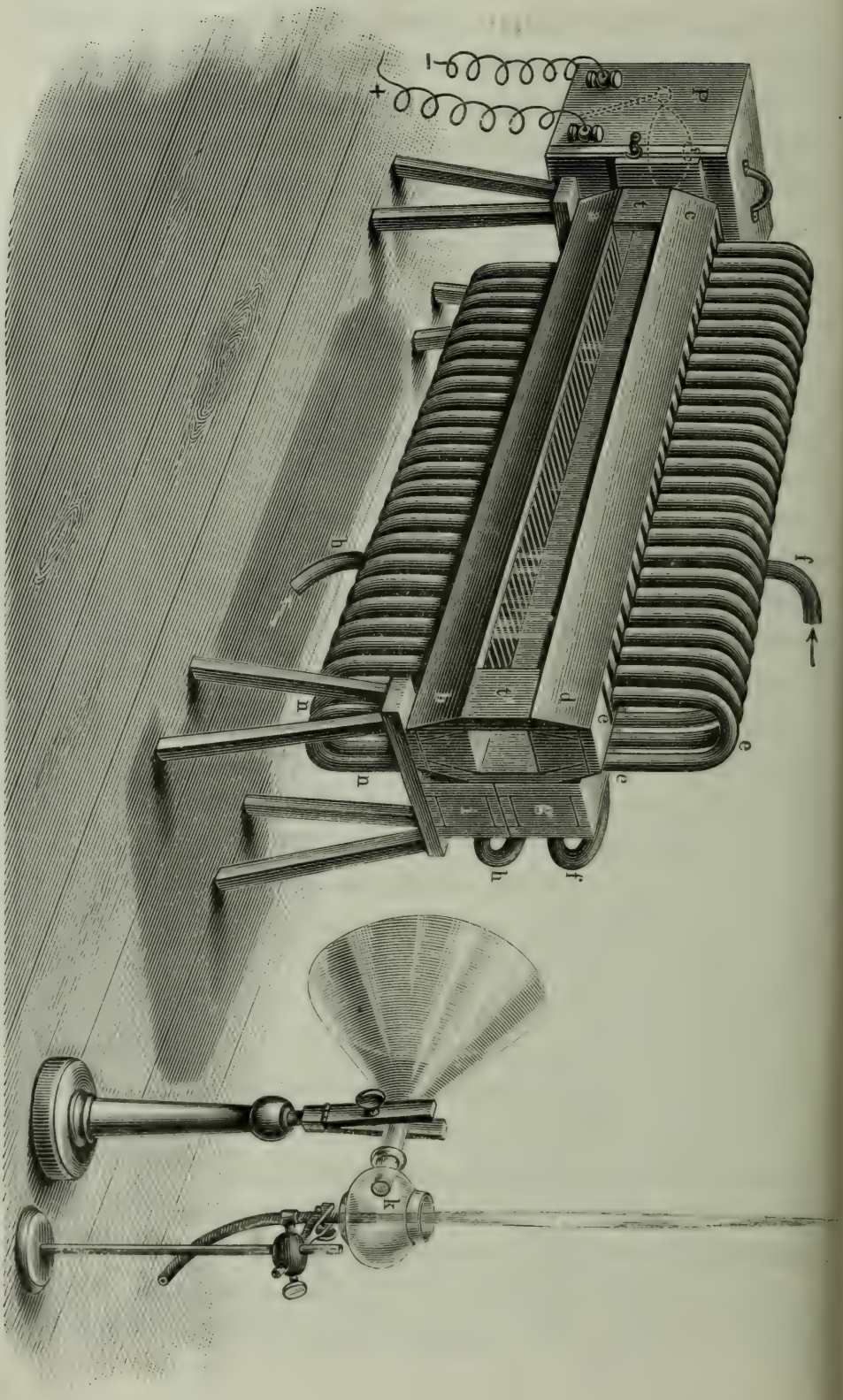
Um die Frage der Luftechos abzuschliessen: Die Sirene stiess drei Töne in der Minute aus, jeden von 5 Secunden Dauer. Nach der Zahl der Tage und der täglichen Stunden, in denen das Instrument in Thätigkeit war, können wir die Zahl der Tonstösse berechnen. Es waren fast 20000. Die Stösse der Hörner waren noch zahlreicher, während Hunderte von Schüssen aus den Geschützen abgefeuert wurden. Wie auch das Wetter sein mochte, wolkig oder hell, stürmisch oder ruhig, niemals fehlten die Luftechos, wenn sie auch an Stärke und Länge von Tag zu Tag wechselten; an

manchen Tagen, „unter einem vollkommen klaren Himmel“, erreichten sie bei der Sirene eine ausserordentliche Intensität. Es unterliegt keinem Zweifel, dass man diesen Luftechos und nicht den Wolkenechos das Rollen des Donners zum grossen Theil zuschreiben muss.

§. 8. Experimenteller Nachweis der Reflexion des Schalls an Gasen.

Bis jetzt haben wir uns nur in theoretischen Schlussfolgerungen bewegt, denn das Aufhalten des Schalls durch Luftreflexion war nie durch Versuche bewiesen worden, und nach Arago's Beobachtungen, die bis jetzt unbezweifelt in der Wissenschaft geherrscht hatten, existirt es auch nicht. Die Macht der Wissenschaft beruht aber auf der Bestätigung durch Prüfung, und ich wünschte sehnlichst, die Frage der Luftreflexion einer experimentellen Prüfung zu unterziehen. Die Kenntnisse, die wir in der letzten Vorlesung gewonnen haben, erlauben uns, eine solche zu unternehmen; aber wie bei vielen ähnlichen Fällen waren es nicht die einfachsten Combinationen, die wir zuerst anwendeten. Es mussten zwei Gase verschiedener Dichtigkeit gewählt werden, und ich wählte Kohlensäure und Leuchtgas. Mit Hülfe meines geschickten Assistenten wurde eine Röhre hergestellt, durch welche 25 Schichten von Kohlensäure hinabsinken und abwechselnd 25 Schichten von Leuchtgas steigen konnten. Durch diese Röhre wurde der Schall geschickt, der 50 Mal von einem Medium zu einem andern auf seinem Wege übergehen musste. Ich dachte, diese würden einen merklichen Theil des Schalls in Luftechos verbrauchen.

Um einen auftretenden Verlust direct zu beobachten, benutzte ich eine der empfindlichen Flammen,


+
-
p
g
t
c
b
f
n
d
e
h
k

die wir im letzten Capitel beschrieben haben. Mit ihrer Hülfe können wir auch eine Zeichnung und eine Beschreibung des zuerst von mir benutzten Apparates zum Beweise der Luftreflexion verstehen. Die folgende Beschreibung des Apparates wurde von einem Mitarbeiter in der Zeitschrift „Nature“ (5. Februar 1874) gegeben:

„Eine Röhre *tt'* (Fig. 157), 5 cm im Quadrat, 1,4 m lang, offen an beiden Enden, vorn mit einer Glasscheibe geschlossen, geht durch den Kasten *a*, *b*, *c*, *d*. Die Räume oben und unten sind in Zellen getheilt, die in die Röhre durch einander genau entsprechende Queröffnungen münden. Die abwechselnden Zellen der oberen Reihen — die 1., 3., 5. u. s. f. — sind durch eine gebogene Röhre (*eee*) mit dem gemeinsamen oberen Behälter (*g*) verbunden, während die ihr entgegengesetzten Zellen in der unteren Reihe einen freien Austritt in die Luft haben. In gleicher Weise sind die 2., 4., 6. u. s. f. der unteren Zellenreihen durch gebogene Röhren mit dem unteren Behälter (*i*) verbunden; jede hat ihren directen Ausgang in die Luft durch die genau über ihr befindliche Zelle. Die Gasbehälter (*g* und *i*) werden zur gleichen Zeit an beiden Enden gefüllt, der obere mit Kohlensäuregas, der untere mit Leuchtgas durch Zweigröhren von ihren entsprechenden Zuflussröhren (*f* und *h*). Ein gut wattirter Kasten (*P*), der am Ende der Röhre offen ist, bildet einen kleinen Hohlraum, von dem aus die Schallwellen durch eine elektrische Glocke (in der Figur punktirt) ausgesendet werden. Einige Decimeter vom anderen Ende der Röhre und gerade vor ihr steht eine empfindliche Flamme (*k*), die mit einem Trichter als Schallsammler versehen und durch einen Schirm gegen etwaigen Luftzug geschützt ist.

„Die Glocke wurde in Bewegung gesetzt. Die Flamme, die auf jeden Schlag des Hammers schnell antwortete, stiess eine Art musikalischen Geräusches aus, und wurde kürzer und länger, wenn die auf einander folgenden Schallimpulse sie erreichten. Dann wurden die Gase zugelassen. 25 flache Ströme von Leuchtgas stiegen von den unteren Röhren auf und 25 Ströme von Kohlensäure sanken von den oberen Röhren nieder. Das, was bisher ein homogenes Medium gewesen war, hatte jetzt 50 Grenzflächen, von deren jeder ein Theil des Schalls zurückgeworfen wurde. In wenigen Augenblicken waren diese auf einander folgenden Reflexionen so wirksam geworden, dass kein Schall, der die Flamme beeinflussen konnte, durch die klare, optisch durchsichtige, aber akustisch undurchlässige Atmosphäre in der Röhre hindurch gehen konnte. Wurde der Gaszufluss abgeschnitten, so diffundirten die Gase schnell in die Luft, die Atmosphäre der Röhre wurde wieder homogen und deshalb akustisch durchlässig und die Flamme entsprach jedem Schallimpuls wie vorher.“

Nicht nur Gase von verschiedener Dichtigkeit wirken in dieser Weise auf den Schall, sondern atmosphärische Luft in Schichten von verschiedener Temperatur wirkt ebenso. Quer durch eine Röhre (ähnlich tt', Fig. 157) waren 66 Platindrähte gespannt, die alle mit einander verbunden waren. Die Glocke in ihrem wattirten Kasten war am einen Ende und die empfindliche Flamme (k) nahe ihrer flackernden Spitze am anderen Ende der Röhre aufgestellt. Ertönte die Glocke, so flackerte die Flamme. Wurde ein Strom von einer starken Batterie durch die Platindrähte geleitet, so wurden sie erhitzt. Schichten von warmer Luft stiegen von ihnen durch die Röhre auf und sofort hörte die Bewegung der Flamme

auf. Wurde der Strom geöffnet, so begann die Wirkung wieder. Die Platindrähte waren bei diesem Versuche noch nicht rothglühend. Wurde die halbe Anzahl derselben verwendet und dieselbe Batterie, so wurden sie rothglühend; dann war die Wirkung auf die Schallwellen ebenfalls energisch. Wurde ein Drittel der Zahl der Drähte verwendet und dieselbe Batterie, so wurden die Drähte weissglühend; auch hier wurde die Flamme augenblicklich durch das Aufhalten des Schalls ruhig.

§. 9. Reflexion an Dämpfen.

Nicht nur Gase von verschiedenen Dichtigkeiten und Luft von verschiedener Temperatur wirken so auf den Schall, es kann auch durch den Versuch gezeigt werden, wie Luft, die mit Dämpfen flüchtiger Flüssigkeiten in verschiedenem Maasse gesättigt worden war, dieselbe Wirkung hervorrufen kann. Es wurde in den Weg, den die Kohlensäure bei unserem ersten Versuch nahm, eine Flasche eingeschaltet, die ich oft dazu benutzt hatte, Luft mit Dampf zu erfüllen. Luft wurde durch eine flüchtige Flüssigkeit, die die Flasche theilweise füllte, in die Röhre *tt'* gepresst, die so in Räume getheilt wurde, die theils mit Dampf gesättigte Luft enthielten, und in anderen Räumen gewöhnliche Luft. Die Wirkung eines solchen Mediums auf die Schallwellen, die von der Glocke kommen, ist sehr energisch, indem die heftig bewegte Flamme sogleich still und ruhig wird. Bei Entfernung des heterogenen Mediums erscheint sogleich das geräuschvolle Flackern der Flamme wieder.

Einige wenige Beispiele der Wirkungen nicht homogener Atmosphären, die durch die Sättigung von Luft-

schichten mit den Dämpfen der flüchtigen Flüssigkeiten erzeugt wurden, mögen hier folgen:

Schwefelkohlenstoff: Flamme sehr empfindlich und dem Schall geräuschvoll antwortend. Die Wirkung der nicht homogenen Atmosphäre war schnell und kräftig, die bewegte Flamme beruhigend.

Chloroform: Flamme noch sehr empfindlich; Wirkung ähnlich der vorhergehenden.

Methyl-Jodid: Wirkung schnell und energisch.

Amylen: Sehr schöne Wirkung; eine kurze und lebhaft erregte Flamme wurde sogleich lang und ruhig.

Schwefeläther: Wirkung rasch und energisch.

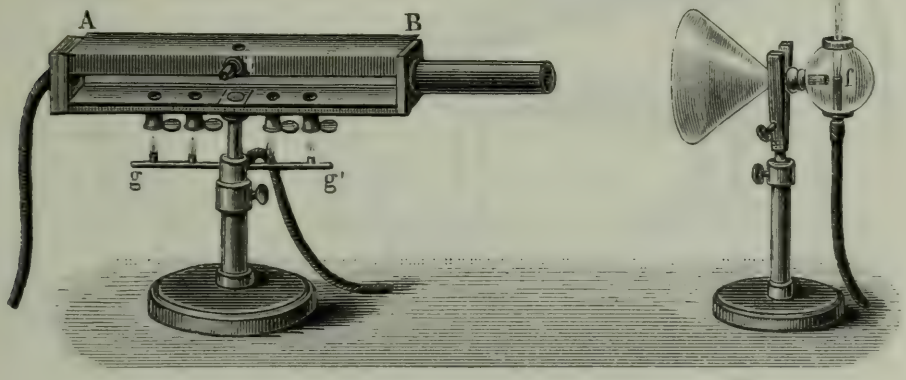
Wasserdampf ist bei gewöhnlicher Temperatur so wenig in der Luft enthalten und so verdünnt, dass es besonderer Vorsicht bedarf, um bei ihm eine Wirkung zu beobachten. Aber bei geeigneten Vorsichtsmaassregeln konnte er auch eine empfindliche Flamme zur Ruhe bringen.

Wie die Geschicklichkeit und die Erfahrungen des Experimentators zunehmen, kann er oft seine Combinationen vereinfachen. So fand man, dass hier durch die passende Aufstellung der Schallquelle und der empfindlichen Flamme nicht nur 25 Schichten, sondern auch drei oder vier Schichten von Leuchtgas und Kohlensäure genügten, um die bewegte Flamme zu beruhigen. Ja, bei noch verbessertem Verfahren war die Wirkung einer einzigen Schicht von einem der beiden Gase vollkommen ausreichend. Die erwärmte Luft von zwei oder drei Kerzen, ja selbst eine einzelne Flamme oder ein erhitzter Feuerhaken genügten, um die Bewegung der Flamme zu verhindern. Dieselbe Erscheinung tritt auch bei den Dämpfen ein. Drei oder vier mit dem Dampfe einer flüchtigen Flüssigkeit gesättigte Schichten beruhigten die

Flamme, und bei verbessertem Verfahren konnte die Wirkung einer einzigen gesättigten Schicht bemerkbar gemacht werden. In allen diesen Fällen konnte überdies eine kleine, hochgestimmte Pfeife statt der Glocke mit Erfolg angewendet werden.

Der einfache, in Fig. 158 skizzirte Apparat, um die Reflexion durch Gase, Dämpfe und erhitzte Luft zu zeigen, ist durch meinen Assistenten zusammengestellt. Am Ende A der quadratischen Pfeife AB ist eine kleine Zunge

Fig. 158.

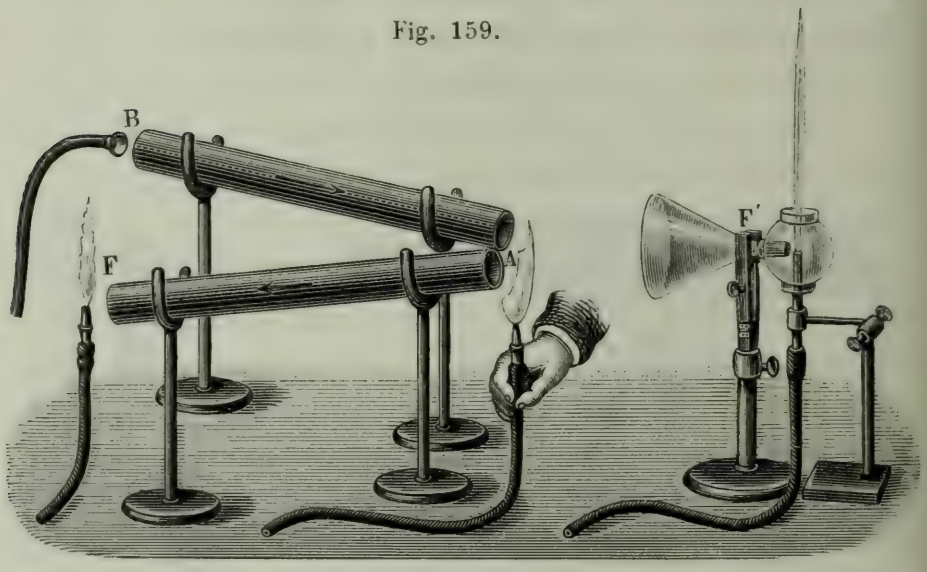


einer Physharmonika angebracht, deren Ton die empfindliche Flamme f heftig erregt. Vier kleine Brenner werden an der horizontalen Röhre gg' befestigt, und über ihnen vier Schornsteine, durch die die erhitzten Gase von den Flammen nach AB aufsteigen können. Wenn die Deckel der Schornsteine entfernt und das Gas entzündet wird, so wird die Luft in AB rasch unhomogen und beruhigt augenblicklich die empfindliche Flamme.

Die Pfeife AB kann von oben nach unten gekehrt werden, die Oeffnung, die man zwischen A und B sieht,

passt auf den Ständer, der die Röhre trägt. Die Leitungsröhre t führt in einen hohlen, rechtwinkeligen Behälter, der durch eine Reihe von Queröffnungen mit AB in Verbindung steht. Wurde Luft, die mit dem Dampf einer flüchtigen Flüssigkeit gesättigt war, durch diese Oeffnungen gepresst, so wurde die Atmosphäre in AB augenblicklich heterogen, und die bewegte Flamme wird ebenso rasch beruhigt.

Fig. 159.



Es wurde in den Versuchen am South Foreland nicht nur bewiesen, dass die akustischen Wolken den Schall auffingen, sondern auch, dass der Schall, dem der Durchgang versagt worden war, durch Reflexion zurückgeworfen wurde. Ich beabsichtigte, dieses Schallecho experimentell sichtbar zu machen und sagte meinem Assistenten, dass wir im Stande sein müssten, es auszuführen. Er kam meinem Wunsche durch folgenden schönen Versuch nach, der in der „Royal Society“ folgendermaassen beschrieben worden ist.

„Eine schwingende Zunge B (Fig. 159) wurde so

aufgestellt, dass sie Schallwellen durch eine Zinnröhre schickte, die 96 cm lang war und 4,5 cm weit war, und zwar in der Richtung BA; die Wirkung des Schalls wurde dadurch sichtbar, dass eine empfindliche Flamme bei F' sich heftig bewegte.

„Man liess die unsichtbare erhitzte Schicht dicht über dem leuchtenden Theile einer entzündeten Leuchtgasflamme, die aus einem gewöhnlichen Fischschwanzbrenner austrat, aufwärts vor dem Ende A der Zinnröhre ausströmen. Ein Theil des aus der Röhre austretenden Schalls wurde an den Grenzflächen der erhitzten Schicht reflectirt; der durchgelassene Theil war nur noch fähig, die empfindliche Flamme bei F' schwach zu bewegen.

„Nun wurde die erhitzte Schicht so geneigt, dass der Schall bei einer Reflexion durch eine zweite Zinnröhre AF (von denselben Dimensionen wie BA) geschickt wurde. Dadurch, dass eine zweite empfindliche, an das Ende der Röhre bei F gestellte Flamme lebhaft erregt wurde, wurde die Wirkung sichtbar. Dieses Echo blieb activ, so lange die erhitzte Schicht dazwischen lag; aber bei ihrer Entfernung erhielt die empfindliche Flamme bei F' den ganzen directen Impuls und wurde wieder lebhaft bewegt, während zur selben Zeit die empfindliche Flamme bei F, da sie nicht mehr vom Echo getroffen wurde, ihre frühere Ruhe wieder annahm.

Dasselbe tritt ein, wenn der leuchtende Theil der Gasflamme zur reflectirenden Schicht gemacht wird; bei den oben beschriebenen Versuchen wurde aber nur die unsichtbare Schicht über der Flamme benutzt. Bei richtiger Wahl des Druckes des Gases kann die Flamme bei F' so wenig empfindlich für die directe Schallwelle

gemacht werden, dass der durch die reflectirende Schicht durchgelassene Theil unfähig ist, die Flamme zu beeinflussen. Dann können durch die Einführung und Wegnahme der Fischschwanzflamme die beiden empfindlichen Flammen abwechselnd beruhigt und heftig bewegt werden.

Fig. 160.

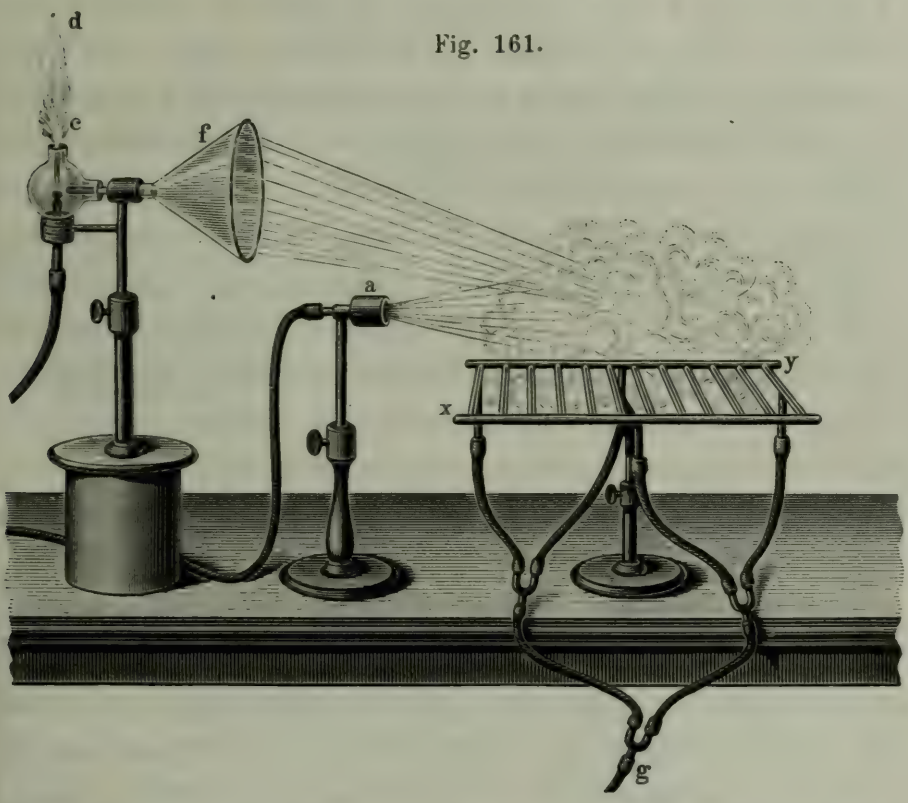
„Hier ist ein Beweis für die vollkommene Analogie von Licht und Schall gegeben; denn, wenn ein Lichtstrahl von B nach F' geht und eine Glasplatte bei A in der gleichen Lage wie der reflectirende Gasstrom eingeführt wird, so wird der Strahl getheilt, ein Theil wird in der Richtung AF reflectirt und der andere Theil durch das Glas nach F' durchgelassen, genau so wie die Schallwelle in einen reflectirten und in einen durchgelassenen Theil durch die Schicht des erhitzten Gases oder der Flamme getheilt wurde.“

Um die Phänomene, die wir in so grossem Maassstabe am South Foreland beobachtet hatten, noch weiter

durch den Versuch wiederzugeben, wurde folgende Aufstellung gewählt.

xy (Fig. 160) ist ein Rechteck in Form eines Rostes, dessen Querstäbe Röhren von 1 cm Durchmesser sind, mit einem Schlitze von 0,15 cm Weite, der oben auf ihnen entlang läuft. Der Rost ist durch Röhren von Kautschuk mit den Gasröhren des Apparates verbunden,

Fig. 161.



so dass, wenn der Hahn *g* gedreht wird, das Gas ziemlich gleichmässig über das Rechteck vertheilt wird und aus den Schlitzen austritt. Es werden so, durch einen Wachsstock entzündet, eine Reihe von niedrigen parallelen Flammen erzeugt. In geringer Entfernung von dem einen Ende des Rostes ist eine Zunge einer Physharmonika aufgestellt, die, wenn sie tönt, die empfindliche Flamme *e* in lebhafte Bewegung versetzt. So wie das Gas angesteckt

wird, ist die Flamme augenblicklich beruhigt, da der Schall die unsichtbare, aber bewegte Luft nicht zu durchsetzen vermag. So ist die bei den verschiedenen Gelegenheiten am South Foreland beobachtete Undurchlässigkeit der Atmosphäre zur Evidenz bewiesen.

Wir lassen die Zunge unverändert stehen, und bringen die Flamme in eine Lage hinter der Zunge, wie in Fig. 161 (a. v. S.). Der Schall ist hier so schwach geworden, dass die Flamme ruhig brennen kann, wenn die Zunge tönt. Sind die Sachen so vorbereitet, so wird das Gas angesteckt und die obere Luft trübe gemacht. Der Schall wird augenblicklich als Luftechos zurückgeworfen, die stark genug sind, um die Flamme *cd* lebhaft zu bewegen. Diese Wirkung tritt jedesmal ein. Wenn das Gas abgestellt ist, brennt nach wenigen Secunden, die die Zinnröhren zum Abkühlen brauchen, die Flamme ruhig, um sogleich wieder bewegt zu werden, sowie sich die unsichtbare akustische Wolke über dem Rost bildet. Wir haben hier die Luftechos vom South Foreland genau nachgeahmt.

Wenn wir eine zweite Flamme benutzen, um die directen Schallwellen aufzufangen, so flackert sie und tönt so lange, als das Gas unangezündet bleibt, während die Flamme hinter der Zunge ruhig ist. Beim Anzünden des Gases wechselt die Erscheinung bei beiden Flammen; diejenige, die den directen Schall erhält, wird ruhig und die andere Flamme bewegt.

Der Rost, den ich jetzt bei meinen Versuchen benutzte, hat einen Rahmen von 63 cm Länge und 30 cm Weite. Er wird von 23 Röhren gebildet, deren Schlitze etwa 2,5 cm von einander entfernt sind[1]). Ein Rost

[1]) Die Röhren, die den Rahmen bilden, haben keine Schlitze.

von der halben Länge und mit der Hälfte der Zahl der Schlitze würde fast ebenso wirksam sein.

So weit haben wir nun unsere Frage auf den sichern Weg des Versuches geleitet, und wir werden auch fernerhin finden, dass wir gute Resultate erhalten.

Zweiter Theil.

Prüfung der Ursachen, die man bis dahin für wirksam hielt, den Durchgang des Schalls durch die Atmosphäre zu verhindern.

Wirkung des Hagels und des Regens. — Wirkung des Schnees. — Wirkung des Nebels: Beobachtungen in London. — Versuche mit künstlichen Nebeln. — Beobachtungen über Nebel am South Foreland. — Wirkung des Windes. — Atmosphärische Auswahl. — Einfluss des Schallschattens.

§. 1. Wirkung des Hagels und des Regens.

Es wurde in dem ersten Theile dieser Vorlesung bewiesen, dass die optische Durchsichtigkeit und die akustische Durchlässigkeit unserer Atmosphäre in keiner Weise übereinzustimmen brauchen, dass an Tagen von wunderbarer optischer Klarheit die Atmosphäre von unsichtbaren akustischen Wolken erfüllt sein kann, während optisch trübe Tage akustisch klar sein können. Wir müssen nun im Einzelnen den Einfluss der verschiedenen Erscheinungen betrachten, von denen man bis dahin angenommen hatte, dass sie auf den Durchgang des Schalls durch die Atmosphäre von Einfluss seien.

Man hat dem fallenden Regen die Fähigkeit zugeschrieben, den Schall merklich aufzuhalten. Eine am 3. Juni gemachte Beobachtung, die Zweifel an dieser

Schlussfolgerung erweckte, ist schon angeführt worden. Zwei andere entscheidende Beobachtungen werden genügen, ihre Unhaltbarkeit zu zeigen. Ein Gewittersturm mit heftigem Regen brach am Morgen des 8. October um 7 Uhr 45 Minuten über Dover aus. Die Wolken zogen nachher vorüber und die Sonne schien kräftig auf die See. Wir dampften hinaus. Die optische Klarheit der Atmosphäre war eine Zeit lang ausserordentlich gross, aber sie war akustisch undurchdringlich. Ein dunkles, schwarzes Gewölk breitete sich um 2 Uhr 30 Minuten Nachmittags wieder über den Himmel nach W.S.W. aus. Wir waren 9,6 km vom South Foreland entfernt, an Bord war Alles still, wir hörten das Horn nur sehr schwach, die Sirene deutlicher, während die Haubitze besser gehört wurde, wenn auch nicht viel stärker als die Sirene.

Ein Regenschauer näherte sich uns vom Westen. Ich habe kaum in den Alpen, noch sonst wo den Himmel schwärzer gesehen. Schwere Wolkenmassen schwebten nach N.O. und S.O., grosse Regenströme fielen im W.N.W., gewaltige Wolkenberge hingen im N., aber einzelne Stellen von blauem Himmel waren im N.N.O. zu sehen.

In der Entfernung von 11,2 km klangen Sirene und Horn beide schwach, während das Geschütz uns einen sehr matten Schall sandte. Ein dichter Regenschauer hüllte jetzt das Foreland ein.

Endlich erreichte uns der Regen, der heftig zwischen uns und dem Foreland niederrauschte; aber statt dass der Schall geschwächt wurde, nahm er an Kraft zu. Es kam jetzt noch Hagel zum Regen, und der Schauer nahm eine tropische Heftigkeit an; die Hagelkörner fielen dicht auf das überschwemmte Deck. Inmitten dieses furchtbaren Sturmes hörte man deutlich die

Hörner und die Sirene, und als der Regenschauer nachliess und so das von ihm bedingte Geräusch abnahm, nahmen die Töne so an Kraft zu, dass wir sie in der Entfernung von 12 km deutlicher hörten, als früher in der regenlosen Atmosphäre bei 8 km.

Um 4 Uhr Nachmittags hatte der Regen aufgehört und die Sonne schien hell durch die ruhige Luft. In der Entfernung von 14,4 km hörten wir das Horn schwach, die Sirene deutlich, während die Haubitze uns einen lauten Knall zusandte. Alle Töne wurden in dieser Entfernung besser gehört, als vorher bei 8,8 km; daraus folgt nach dem Gesetze des umgekehrten Quadrates, dass die Intensität des Schalls in 8,8 km Entfernung um wenigstens das Dreifache durch den Niedergang des Regens erhöht gewesen war.

Am 23. October hatte uns unser Dampfer verlassen, um einen Schutzhafen zu suchen, und ich wollte das Wetter benutzen, um einige andere Beobachtungen auf beiden Seiten der Nebelsignalstation zu machen. Herr Douglas, der Oberingenieur des Trinity House, war so freundlich, die Beobachtungen im N.O. vom Foreland zu übernehmen, während Herr Ayres, der Assist.-Ingenieur, nach der anderen Richtung ging. Um 12 Uhr 50 Minuten Nachmittags blies der Wind sehr heftig und ein Gewittersturm mit heftigem Regen brach aus. Herr Ayres hörte den Schall der Sirene durch den Sturm innen und aussen von der Cornhill Coastguard-Station, 1,6 km von den Instrumenten in der Richtung nach Dover, und als der Regen aufgehört hatte, wurden alle Töne noch deutlicher gehört als zuvor. Herr Douglas hatte einen Wagen vorher nach Kingsdown geschickt, und der Kutscher hatte 15 Minuten auf ihn warten müssen. Während der Zeit war kein Ton gehört worden, obgleich

40 Mal in der Zeit geblasen worden war; auch der diensthuende Küstenwächter, ein geübter Beobachter, hatte keinen Ton während des ganzen Tages gehört. Während des Gewittersturmes und während der Regen mit einer Heftigkeit fiel, die Herr Douglas als tropisch bezeichnete, wurden die Töne von Allen gehört.

Ich habe niemals bemerkt, dass der Regen auch nur den geringsten Einfluss auf den Schall ausübt. Die verrufene Scheidewand, die das „schlechte Wetter" für den Durchgang des Schalls sein sollte, war einer der Gründe, warum man zögerte, Schallsignale an unseren Küsten aufzustellen. Hoffentlich wird die Widerlegung dieses Irrthums zum Vortheil der kommenden Generationen der Seefahrer dienen.

§. 2. Wirkung des Schnees.

Man hat den fallenden Schnee als das allergrösste Hinderniss für den Durchgang des Schalls angesehen. Wir haben unsere Beobachtungen am South Foreland nicht bis zum Eintritt von Schneewetter ausgedehnt; aber eine meiner früheren Beobachtungen bezieht sich gerade auf diesen Punkt. Ich kam in der Weihnachtsnacht 1859 nach Chamonix durch so tiefen Schnee, dass er den Hang an der Strasse bedeckte und die Erreichung des Dorfes äusserst erschwerte. Am 26. und 27. December fiel er sehr dicht. Am 27., während einer Pause im Sturm, erreichte ich den Montanvert, zuweilen bis an die Brust in den Schnee versinkend. Am 28. wurden mit grosser Mühe zwei Reihen Stangen quer über den Gletscher aufgestellt, um seine Fortbewegung im Winter zu bestimmen. Am 29. schrieb ich am Morgen in mein Tagebuch: „Schnee, heftiger Schnee; er muss die ganze

Nacht gefallen sein, die frisch gefallene Menge ist so gross."

Bei diesen Witterungsverhältnissen stellte ich meinen Theodoliten neben dem Mer de Glace auf, an einer Stelle, zu der ich durch Schnee waten musste, der mir, da er trocken war, fast bis an die Brust reichte. Assistenten wurden über den Gletscher geschickt mit Instructionen, um die Veränderung in der Stellung der Reihe der Pfähle, die wir transversal vorher in den Schnee gestossen hatten, zu messen. Ein Sturm kam das Thal heraufgezogen und verfinsterte bei seiner Annäherung die Luft. Er erreichte uns und der Schnee fiel viel dichter, als ich es sonst irgend wo jemals gesehen hatte. Er hatte bald einen Haufen über dem Theodoliten gebildet und bedeckte dicht meine Kleider. So war hier Schnee in der Luft und loser, frischer Schnee auf dem Boden. Wir hatten also gleichzeitig ein Zusammentreffen von Versuchsbedingungen, wie sie mir nie vorher entgegengetreten waren; nichtsdestoweniger konnten durch diese Atmosphäre meine Instructionen quer über den ganzen Gletscher, in der Entfernung von 0,8 km, gehört werden, und eben so hörte ich in umgekehrter Richtung die Stimme eines meiner Assistenten.

Seit jener Zeit hatte ich verschiedentlich Gelegenheit, unter erschwerenden Bedingungen die Wirkung des frisch gefallenen Schnees auf den Schall zu prüfen. Im Jahre 1878 z. B. nahm ich Glocken mit auf die Alpen, die durch Schläge von vollkommen genau bestimmter Kraft geläutet werden konnten. Am 25. September übernahm meine Frau eine von ihnen, während ich mich in einiger Entfernung durch dicken Nebel und tiefen Schnee von ihr getrennt aufstellte. Zwischen uns lag also eine Verbindung der beiden Agentien, die als die

dem Durchgang des Schalls am hinderlichsten angesehen wurden. Trotzdem war die akustische Durchlässigkeit der Luft an diesem Tage ausserordentlich gross. Die Glocke hatte noch bei keiner anderen Gelegenheit ihre Schwingungen so weit fortgesandt. Ein Bereich von 820 m galt unter gewöhnlichen Umständen für beträchtlich; aber am 25. betrug der Bereich 1188,2 m.

§. 3. Durchgang des Schalls durch Gewebe und durch künstlich erzeugte Regenschauer.

Die Flocken fielen auf dem Mer de Glace so dicht, dass ich nur von Zeit zu Zeit die Gestalten der sich entfernenden Männer erblicken konnte. Dennoch war die Luft, durch die die Flocken fielen, für den Schall continuirlich. Gaben die Flocken nur passiv den Tonwellen nach und schwangen wie die Lufttheilchen selbst hin und her, wenn die Schallwellen sie durchschnitten? Oder legten sich die Wellen durch Beugung gekrümmt rund um die Flocken und verliessen sie ohne merkbaren Verlust? Der Versuch zeigt uns die ausserordentliche Leichtigkeit, mit welcher der Schall seinen Weg durch Hindernisse bahnt und durch Gewebe geht, so lange als die Luft in ihren Zwischenräumen ihren Zusammenhang bewahrt.

Ein Stück Glas, ein Holzbrett oder die Hand vor das offene Ende t der Röhre $abcd$ (Fig. 157) gelegt, schneidet den Ton der Glocke ab, die in den gepolsterten Kasten P gestellt worden war und brachte die empfindliche Flamme K zur Ruhe.

Dagegen wirkte ein gewöhnliches, baumwollenes Taschentuch, das über das Ende der Röhre gelegt wurde, kaum merklich auf den Schall ein. Durch zwei Lagen

des Taschentuches hindurch wurde die Flamme stark bewegt; durch vier Lagen wurde sie noch sehr merklich bewegt; während sie hinter sechs Lagen, wenn auch bedeutend ruhiger, doch noch nicht ganz still war.

Wurde dasselbe Taschentuch in Wasser getaucht und eine einzige nasse Lage über das Ende der Röhre gebreitet, so beruhigte es die Flamme ebenso erfolgreich, wie das Holz. Legte man das Taschentuch zwischen zwei Löschblätter und drückte es so aus, dass das Wasser entfernt wurde, so wurde seine Durchlässigkeit sogleich wieder hergestellt. Daher der Schluss, dass die Schallwellen durch die Zwischenräume des Gewebes gehen.

Der Schall ging ohne merkbare Unterbrechung durch eine einfache Lage von dünner Seide; hinter sechs Lagen war die Flamme stark bewegt, während hinter zwölf Lagen die Beunruhigung noch sehr sichtbar war.

Eine einzelne durchnässte Lage der Seide beruhigte die Flamme.

Eine Lage von weichem Leinen wirkte auf den Schall wenig; eine Lage von dickem Flanell war fast ebenso unwirksam. Die Flamme wurde durch vier Flanelllagen merklich beunruhigt. Der Schall ging durch eine einzelne Lage von grünem Fries fast so frei hindurch als durch Luft; durch vier Frieslagen war die Wirkung noch bemerkbar. Die Schallwellen gingen durch eine Lage von dichtem, hartem Filz mit solcher Energie, dass sie die Flamme bedeutend beunruhigten. Der Schall ging durch 200 Lagen von baumwollenem Netzgewebe frei hindurch. Nicht ohne Ueberraschung sah ich diese Wirkungen. Sowohl durch den Filz, wie durch das baumwollene Netz konnte man, wenn man sie an den Mund legte, Luft hindurchziehen. Für das Licht waren sie indess ganz undurchdringlich.

Eine einzige Lage von dünner geölter Seide hielt den Schall auf und beruhigte die Flamme. Ein Blatt gewöhnliches Schreibpapier oder eine Fünfpfundnote hielten auch den Schall auf.

Die empfindliche Flamme ist für diese Versuche nicht unumgänglich nothwendig. Wird eine tickende Uhr 15 cm vom Ohre entfernt aufgehängt und ein baumwollenes Taschentuch dazwischen gebracht, so wird das Ohr kaum durch das Ticken berührt; ein Blatt Wachstuch oder eine stark erhitzte Gassäule schneidet das Ticken fast ganz ab.

Obgleich geölte Seide, dünnes Postpapier oder eine Banknote den Schall aufhalten können, so lässt ein Häutchen, das dünn genug ist, um den Luftwellen frei nachzugeben, ihn durch. Eine dicke Seifenhaut übt eine merkbare Wirkung auf den Schall aus, eine sehr dünne vermag es nicht. Die Zunahme der Intensität des durchgelassenen Schalls kann gleichzeitig mit der Entwickelung und dem Glänzenderwerden der Regenbogenfarben verfolgt werden, welche letztere die abnehmende Dicke des Häutchens angeben. Ein sehr dünnes Collodiumhäutchen wirkt ebenso.

Man kann diese Versuche auch sehr leicht anstellen, wenn man eine kleine Physharmonikazunge an einem Ende einer Zinnröhre anregt und die empfindliche Flamme in geringer Entfernung vom anderen Ende aufstellt.

Bei Berücksichtigung der eben besprochenen Beobachtungen über den Durchgang des Schalls durch Baumwolle, Seide, Leinen, Flanell, Fries, Filz kann es Sie nicht überraschen, dass die Schallwellen ohne merkbare Schwächung durch schwere Regenschauer, durch Hagel und Schnee hindurch gehen können. Auch durch künst-

liche Schauer aus Wassertropfen, Samen, Sand, Kleie, Flocken verschiedener Art geht der Schall wie durch den wirklichen Regen, Hagel, und durch den Schnee auf dem Mer de Glace ohne merkbare Schwächung hindurch.

§. 4. Wirkung des Nebels. Beobachtungen in London.

Noch aber müssen wir mit dem grössten Feinde des Seefahrers, dem Nebel, uns eingehend beschäftigen; hier fehlten aber lange Zeit die nothwendigen Bedingungen zum Versuche. Wir hatten bis Ende November viele Tage Dunst, der hinlänglich dicht war, um die weissen Klippen vom Foreland zu verhüllen, aber keinen wirklichen Nebel. Doch ergab sich aus Versuchen endgültig, dass die Ansichten, die man über die Reflexion des Schalls an schwebenden Theilchen hatte, falsch seien; denn an vielen Tagen des dichtesten Dunstes verbreitete sich der Schall doppelt so weit als an anderen Tagen von vollkommener optischer Durchsichtigkeit. Dadurch war die Annahme widerlegt, dass eine Verbindung zwischen akustischer Durchlässigkeit und optischer Durchsichtigkeit bestehe, aber die Frage nach der Wirkung der dichten Nebel blieb unentschieden.

Am 9. December herrschte ein denkwürdiger Nebel in London. Ich telegraphirte nach dem Trinity House und schlug einige Schussbeobachtungen vor. Umgehend kam die Antwort, dass sie am Nachmittag in Blackwall gemacht werden würden. Ich fuhr nach Greenwich, in der Hoffnung, die Geschütze über den Fluss zu hören; in Folge der Verzögerung des Zuges durch den Nebel kam ich aber zu spät. Der Nebel lag über dem Fluss

sehr dicht und durch ihn drangen verschiedene Töne mit grosser Deutlichkeit. Hell erklang die Signalglocke einer unsichtbaren Barke von Zeit zu Zeit, und ich konnte deutlich das Hämmern in Cubitts Town hören, in einer Entfernung von 0,8 km auf der anderen Seite des Flusses. Ein Vernichten des Schalls durch den Nebel war nicht bemerkbar.

Durch diesen Nebel und verschiedene locale Geräusche hörten Capitain Atkins und Herr Edwards den Schuss einer zwölfpfündigen Kanone mit einpfündiger Ladung weit besser als den eines Achtzehnpfünders mit einer dreipfündigen Ladung am 3. Juli bei optisch klarer Atmosphäre und fern von allem Geräusch.

Da mir viel daran lag, Versuchsbedingungen, auf die ich so lange gewartet hatte, auszunutzen, versuchte ich es mit Versuchen in kleinem Maassstabe. Ich stellte meinen Assistenten mit einer Pfeife und einer Orgelpfeife auf den Weg am Südwestende der Brücke zwischen Hyde Park und Kensington Gardens. Vom östlichen Ende der Serpentine hörte ich beide deutlich, die Pfeife und die Orgelpfeife, die 380 Wellen in der Secunde erzeugten. Als ich mit meinem Assistenten die Plätze wechselte, hörte ich eine Zeit lang nur deutlich den Ton der Pfeife. Endlich erreichte mich auch der tiefere Ton der Orgelpfeife, der zeitweise zu grosser Deutlichkeit stieg, zeitweise unhörbar war. Die Pfeife zeigt dieselbe zeitliche Intermittenz, aber im entgegengesetzten Sinne; denn wenn der Ton der Pfeife schwach war, war der der Orgelpfeife stark, und umgekehrt. Wollte man den Grundton der Orgelpfeife erhalten, so musste sie sanft angeblasen werden, und im Ganzen zeigte sich die Pfeife besser geeignet, den Nebel zu durchdringen.

Eine ungewöhnlich grosse Schallmenge erfüllte die

Luft während dieser Versuche. Der Widerhall des Lärms der Bayswater- und Knightbridge-Strassen, der Klang der grossen Glocke von Westminster, die Eisenbahnpfeifen, die oft angeblasen wurden, und die Nebelsignale, die an den verschiedenen Stationen der Hauptstadt erdröhnten, wurden alle mit grosser Intensität gehört. Dies entsprach auf keinen Fall den so kategorisch gemachten Angaben über die akustische Undurchdringlichkeit des Londoner Nebels.

Am 11. December, an dem der Nebel noch dichter war, hörte ich jeden Ton der Pfeife, und hin und wieder den Ton der Orgelpfeife zwischen der Brücke und dem östlichen Ende der Serpentine. Als ich mit meinem Assistenten auf der Brücke zusammentraf, hörten wir beide laut den Donner eines Geschützes. Ein Polizeiinspector bestätigte, dass derselbe von Woolwich käme, und dass er mehrere Schüsse, etwa um 2 Uhr Nachmittags und vorher gehört habe. Diese Thatsache, wenn sie richtig war, war von der grössten Wichtigkeit; so telegraphirte ich nach Woolwich um Nachricht. Professor Abel gab mir freundlich folgende näheren Angaben:

„Das Feuern fand um 1 Uhr 40 Minuten Nachmittags statt. Die zu prüfenden Geschütze waren verhältnissmässig klein: 64-Pfünder mit 10 Pfund Pulverladung.

„Die Erschütterung, die ich etwa 1,2 km von dem Strande in meinem Hause und im Bureau empfand, war entschieden weit heftiger, als die, welche man empfindet, wenn die schwersten Geschütze mit Ladungen von 110 bis 120 Pfund Pulver erprobt werden. Wir hatten dichten Nebel zur Zeit, da wir feuerten.“

Es waren dies die Geschütze, die der Polizei-

inspector gehört hatte; eine spätere Nachfrage ergab, dass die beiden Kanonen um etwa 3 Uhr Nachmittags abgefeuert worden waren. Es waren die Geschütze, die ich selbst gehört hatte.

Professor Abel theilte mir auch folgende Thatsache mit: „Die Glocke unserer Arbeiter am Gitter des Arsenals, die mässig gross ist und einen nichts weniger als hellen Ton giebt, wird von Professor Bloxam nur dann ziemlich deutlich gehört, wenn der Wind Nord-Ost ist. Während der ganzen letzten Woche wurde die Glocke sehr deutlich gehört, obgleich der Wind südwestlich (dem Schall entgegen) war. Die Entfernung der Glocke von Bloxam's Hause beträgt etwa 1,2 km."

Sicher bedurfte keine wissenschaftliche Frage jemals so nothwendig einer Revision, als die hier behandelte über den Durchgang des Schalls durch die Atmosphäre. Wir haben Schritt für Schritt die Antwort auf die Frage gefunden, und je weiter wir kamen, desto klarer wurde es uns, dass unsere früheren Anschauungen von Anfang bis zu Ende irrig waren.

Am Morgen des 12. erreichte der Nebel seine höchste Dichtigkeit. Es war mir nicht möglich, an meinem Fenster, das gegen den offenen westlichen Himmel lag, zu lesen. Um 10 Uhr 30 Minuten schickte ich meinen Assistenten nach der Brücke und horchte nach seiner Pfeife und seiner Orgelpfeife am östlichen Ende der Serpentine. Die Pfeife hatte zeitweilig eine Stärke, die alles früher Gehörte weit überstieg, aber sie sank bisweilen bis zur Unhörbarkeit; sie zeigte dadurch an, dass, obgleich die Luft vollkommen homogen erschien, doch akustische Wolken durch den Nebel sich bewegten. Eine zweite Pfeife, die gestern ganz unhörbar

war, konnte man an diesem Morgen ganz deutlich hören. Wir konnten weit leichter als gestern quer über die Serpentine mit einander sprechen.

Wir vermochten ein- oder zweimal während unserer Sommerbeobachtungen die Lage von Foreland in dickem Nebel durch die Richtung des Schalls zu bestimmen. Heute wanderte mein Assistent, im Nebel verborgen, nach dem Hause des Fährmanns, auf seiner Pfeife pfeifend, und ich ging auf der entgegengesetzten Seite der Serpentine und konnte eine Zeit lang genau beobachten, dass die uns verbindende Linie schräg zur Richtung des Flusses stand. Als ich an einem Punkte angekommen war, der, wie es mir schien, ihm gerade gegenüber lag, bezeichnete ich denselben, und wir fanden am folgenden Tage, als der Nebel fortgezogen war, dass meine Bestimmung ganz richtig gewesen war. Ist das Ohr etwas geübt, so kann es, wenn es nicht durch Echos gestört wird, mit grosser Genauigkeit die Richtung des Schalls bestimmen. Es ist dies ein sehr schwieriges Problem, und, obgleich es von Lord Rayleigh und Anderen behandelt wurde, noch kaum aufgeklärt.

Als ich an diesem Morgen zur Serpentine kam, schien das Läuten der Glocken, das gerade anfing, so nahe zu sein, dass ich einiges Nachdenkens bedurfte, um mich zu überzeugen, dass sie im Norden vom Hyde Park läuteten. Die Töne schwankten wunderbar in ihrer Kraft. Ehe die grosse Glocke von Westminster elf Uhr schlug, läutete eine nähere Glocke mit grossem Geräusch. Nachher wurden die fünf ersten Schläge der Westminster-Glocke gehört, von denen der eine ausserordentlich laut war; die letzten sechs Schläge waren aber unhörbar. Ein Assistent wurde aufgestellt, um auf die 12 Uhr-Glocken zu warten. Die Glocke, die um 11 Uhr so

laut getönt hatte, war unhörbar um 12 Uhr, während von der Westminster-Glocke acht Schläge von zwölf unhörbar waren. Solch eigenthümlichen Wechseln ist der Zustand der Atmosphäre unterworfen.

Man hörte um 7 Uhr Nachmittags absolut gar nichts vom Schlagen der Westminster-Glocke von der Serpentine aus, während die vorher schon erwähnte nähere Glocke deutlich gehört wurde. Der Nebel hatte sich verzogen und man konnte vom östlichen Ende der Serpentine aus die Lampen auf der Brücke hell brennen sehen; aber statt dass die Durchlässigkeit für den Schall an der Durchdringlichkeit für das Licht Theil nahm, trat ein akustischer Nebel an Stelle desjenigen für das Licht. Mehrere Serien wurden auf der Pfeife und der Orgelpfeife nach einander gepfiffen; nur eine Serie von den Pfeifentönen wurde gehört, alle anderen waren ganz unhörbar. Drei Serien von der Orgelpfeife wurden gehört, aber nur sehr schwach. Als wir unsere Stellungen änderten und gepfiffen wurde wie vorher, hörte man absolut gar nichts.

Um 8 Uhr erklang das Geläute und die Stundenglocke der Westminster-Uhr beide sehr laut. Der „akustische Nebel“ war gewichen.

Ungewöhnliche Schwankungen wurden auch im Schall der Kirchenglocken beobachtet: in wenigen Secunden sank er von einem lauten, schallenden Getön zur tiefen Stille, um dann rasch wieder seine ursprüngliche Stärke anzunehmen. Das Vorbeischweben des Nebels vor der Sonnenscheibe, durch das zeitweise das Licht getrübt, zeitweise enthüllt wird, entspricht optisch diesen Wirkungen. In Betreff solcher Wechsel ist das akustische Verhalten der Atmosphäre eine getreue Wiedergabe ihres optischen Verhaltens.

Um 9 Uhr Nachmittags hörte man nur drei Schläge der Uhr von Westminster, die anderen waren unhörbar. Die Luft war theilweise wieder in ihren Zustand von 7 Uhr Nachmittags zurückgekehrt, als alle Schläge unhörbar waren. Die Stille im Park war an diesem Abende höchst auffallend, wenn man sie mit dem dröhnenden Geräusche verglich, das an den beiden vorhergehenden Tagen die Luft erfüllte. In der That war der Schall in der optisch klaren, aber akustisch bewegten Atmosphäre erstickt worden.

Als am 13. statt des Nebels ein leichter Dunst herrschte, ging ich wieder zur Serpentine. Der Schall der Wagenräder war ausserordentlich gedämpft. Das Getöse der Knightbridge- und Bayswaterstrasse hatte abgenommen, man hörte den Schritt der Truppen, die in unserer Nähe marschirten, nicht, während um 11 Uhr Morgens das Geläute und auch die Stundenglocke der Westminster-Uhr erstickt war. Subjectiv betrachtet, war Alles für Schalleindrücke günstig; aber dieselbe Ursache, die die localen Geräusche dämpfte, vernichtete auch die von uns hervorgerufenen Töne. Die Stimme meines Assistenten, den ich vollkommen deutlich mir gegenüber sah, klang heute von der Serpentine weit schwächer, als an den anderen Tagen, wo jeder von uns vor dem Anderen durch den dichtesten Nebel verborgen war.

Als ich die Schallquelle an das östliche Ende der Serpentine gestellt hatte, ging ich an ihrem Rande entlang von der Brücke bis zum Ende. Die Entfernung zwischen diesen beiden Punkten beträgt etwa 1000 Schritt. Nachdem ich 500 gegangen war, war der Schall nicht mehr so deutlich, als er am Tage des dichtesten Nebels auf der Brücke gewesen war. Die optische Reinigung

der Luft durch das Verdampfen des Nebels hatte sie akustisch so verdunkelt, dass ein am östlichen Ende der Serpentine erzeugter Schall halbwegs zwischen dem Ende und der Brücke auf ein Viertel seiner Intensität gedämpft wurde.

Ausser diesen Beobachtungen sollen noch die folgenden mitgetheilt werden. An mehreren der feuchten und warmen Tage Anfangs des Jahres 1874 stand ich Nachmittags am Geländer vom St. James Park, nahe dem Buckingham Palast, 1,2 km vom Glockenthurm entfernt, der deutlich sichtbar war. Kein einziger Schlag von „Big Ben“ wurde gehört. Am 19. Januar umhüllten Nebel und sprühender Regen den Thurm, und doch hörte ich von derselben Stelle aus nicht nur die Schläge der grossen Glocke, sondern auch das Läuten der Revierglocken. Während des ausnehmend dichten und tropfenden Nebels am 22. Januar hörte ich von demselben Gitter aus jeden Schlag der Glocke. Am Ende der Serpentine, als der Nebel am dichtesten war, hörte man die Glocke von Westminster laut 11 Uhr schlagen. Gegen Abend begann sich der Nebel zu lichten, und um 6 Uhr ging ich nach dem Ende der Serpentine, um die Wirkung der optischen Klärung auf den Schall zu beobachten. Kein einziger der Schläge der Uhr traf mein Ohr. Um 9 Uhr und um 10 Uhr war mein Assistent an derselben Stelle, und beide Mal hörte er nicht einen einzigen Schlag der Glocke. Es war ein ganz ähnlicher Fall wie am 13. December, als die Auflösung des Nebels von einer entschieden akustischen Verdunkelung begleitet war [1]).

---

[1]) Ein Freund benachrichtigte mich, dass er einer Koppel Hunde an einem klaren Tage gefolgt sei, ohne ein einziges Bellen der Hunde zu

§. 5. Beobachtungen am South Foreland.

So befriedigend und abschliessend auch diese Resultate erscheinen, so wünschte ich doch sehr, sie durch die Versuche mit den gegenwärtig am South Foreland angewendeten Instrumenten zu bestätigen. Ich hatte am 10. Februar die Genugthuung, vom Deputy master des Trinity House folgenden Brief mit Einlage zu erhalten:

„Mein lieber Tyndall! Die Einlage wird Ihnen zeigen, wie vollkommen Ihre Ansichten der Wahrheit entsprechen, und ich schicke sie gleich, ohne weitere Details abzuwarten. Ich denke, Sie werden froh sein, diese zu erhalten; sobald ich den Bericht habe, schicke ich ihn Ihnen. Ich dachte mir vor zehn Tagen, es könnte möglich sein, bei dem leicht zum Nebel geneigten Wetter Beobachtungen zu machen, und schickte daher sogleich den „Argus“ fort, und bat die Nebelcommission, ein Mitglied an Bord zu belassen. Am Freitag war ich so sicher, dass der Nebel eintreten würde, dass ich Edwards hinschickte, um die Beobachtungen aufzuschreiben . . . . . .

Ihr ganz ergebener
Fred. Arrow.“

Die erwähnte Einlage bestand aus Bemerkungen von Capitän Atkins und Herrn Edwards. Capitän Atkins schrieb folgendermaassen:

„Ich kam, wie verabredet war, mit dem Schnellzuge hierher und traf Herrn Edwards auf der Station Cannon Street. Wir stiegen in „Dover Castle“ ab und am nächsten Morgen um 7 Uhr wurde ich durch den Schall der Sirene geweckt. Als ich aufsprang, sah ich, dass

---

hören, während an ruhigen Nebeltagen aus derselben Entfernung das musikalische Heulen der Koppel laut hörbar war.

der lang erwünschte Nebel eingetreten war und dass der „Argus“ seine Anker gelichtet hatte.

„Wäre ich aber auch selbst an Bord gewesen, so hätten die Instructionen, die ich Troughton (Steuermann des „Argus“) gegeben hatte, nicht besser ausgeführt werden können. Am Nachmittage lichtete sich der Nebel und der „Argus“ kehrte an seinen Ankerplatz zurück; ich hörte, dass sie den Schall beider, der Sirene und des Hornes, in einer Entfernung von 17,6 km von der Station gehört und dort eine Boje ausgeworfen hätten. Dies war richtig, da ich diesen Morgen die Boje wieder aufgefischt habe und die Entfernung sowohl herein wie heraus mit Troughton's Angabe übereinstimmte. Ich war auch am Varne Leuchtschiff (20,4 km vom Foreland) und überzeugte mich, dass sie während des Nebels am Sonnabend Vormittag „deutlich“ den Schall hörten.“

Herr Edwards, der während unserer Sommer- und Herbstbeobachtungen stets an meiner Seite war und der vollständig competent ist, den Schall seiner relativen Stärke nach abzuschätzen, bemerkte, dass der Schall am 7. „besonders laut“ gewesen sei, da sie beide, Capitän Atkins und er, davon geweckt wurden. Er erinnerte sich nicht, jemals vorher den Schall in Dover so laut gehört zu haben; es hätte geschienen, als ob die Beobachter dicht am Instrument ständen.

Andere Nebeltage gingen diesem voraus und waren alle von akustischer Durchlässigkeit; der Tag des dichtesten Nebels war akustisch der klarste von allen.

Die hier mitgetheilten Resultate sind von der grössten Wichtigkeit, denn sie beziehen sich auf einen dichten Nebel und ein wirkliches Nebelsignal und bestätigen in der abschliessendsten Weise die in London gemachten Beobachtungen.

Es ist höchst interessant, die Durchlässigkeit der Luft für den Schall am 7. Februar mit derjenigen am 14. October zu vergleichen. Der Wind hatte an beiden Tagen dieselbe Stärke und Richtung. Meine Notizen bei den Beobachtungen sagen aus, dass der letztere Tag ein optisch durchaus klarer Tag gewesen sei. Die Entfernung betrug 16 km. Während des Nebels am 7. Februar hörte der „Argus“ den Schall bis zu 17,6 km und er wurde auch am Varne Leuchtschiff gehört, das 20,4 km vom Foreland entfernt ist.

Wichtig ist es auch, zu beachten, dass der Schall durch denselben Nebel auf dem Leuchtschiff am South Land Head sehr gut gehört wurde, das in der entgegengesetzten Richtung vom South Foreland liegt und thatsächlich sich hinter der Sirene befand. Wir müssen diesen wichtigen Umstand im Gedächtniss behalten: zufällig war die Sirene am 7. nach Dover und nicht nach dem „Argus“ gerichtet. Wäre die Yacht in der Axe des Instruments gewesen, so ist es fast sicher, dass man den Schall auf der ganzen Strecke bis zur Küste von Frankreich gehört haben würde.

Es ist wohl kaum nothwendig, dass ich ein Wort sage, um mich gegen das Missverständniss zu schützen, als ob ich annähme, dass der Schall durch den Nebel selbst unterstützt würde. Die Nebeltheilchen haben auf die Schallwellen nicht mehr Einfluss, als die über den Sandbänken von Neufundland in die Höhe geschleuderten schwebenden Theilchen auf die Wellen des Atlantischen Oceans. Beim Auftreten von Nebel ist die Luft gewöhnlich homogen und daher kommt die akustische Klarheit des Nebelwetters.

§. 6. Versuche über künstliche Nebel.

Die Ergebnisse dieser Beobachtungen sind durch Versuche im Laboratorium bestätigt und vollkommen einwandsfrei gefunden worden. Bei dieser Gelegenheit werden wir auch sehen, wie vorsichtig in manchen Fällen ein Experimentator vorgehen muss.

Der Rauch von schwälendem braunem Papier strömte in der Röhre tt' (Fig. 157) durch die rechtwinkeligen Oeffnungen aufwärts; die Wirkung auf die Schallwellen war so stark, dass die kurze und bewegte empfindliche Flamme K hoch und ruhig brannte.

Luft ging zuerst durch Ammoniak, dann durch Salzsäure, und wurde, mit dickem Dampf beladen, in die Röhre gelassen; die bewegte Flamme wurde sogleich ruhig und zeigte so eine sehr entschiedene Wirkung des künstlichen Nebels an.

Luft, die durch Zinnchlorid gegangen war und in die Röhre gelassen wurde, erzeugte sehr dicken Rauch. Die Wirkung auf die Schallwellen war sehr bedeutend.

Auch der dichte Rauch von vor dem offenen Ende der Röhre abgebranntem Harz, der dann mit einem Blasebalg in sie hinein geblasen wurde, hielt Schallwellen auf und beruhigte die bewegte Flamme.

Der Schluss, dass der Rauch den Schall dämpft, scheint auf der Hand zu liegen und ist in vollkommener Uebereinstimmung mit den herrschenden aprioristischen Ansichten über die Wirkung des Nebels auf den Schall. Doch ist Vorsicht geboten. Der Rauch des braunen Papiers war heiss; die Flasche, welche die Salzsäure enthielt, war heiss, ebenso war diejenige heiss, die das Zinnchlorid enthielt, und der durch eine rothglühende Feuerschaufel

erzeugte Rauch war offenbar auch heiss. Waren die Resultate nun dem Rauch an sich oder den Temperaturunterschieden zuzuschreiben? Die Beobachtungen konnten wohl für einen unvorsichtigen Denker eine Falle bilden.

Anstatt des Gemisches von Rauch und erhitzter Luft liess man die erhitzte Luft allein von vier rothglühenden Feuerschaufeln aufwärts in die Röhre strömen; die Wirkung auf die Schallwellen war sehr entschieden, obgleich die Röhre optisch leer war. Eine Kerzenflamme wurde an das Röhrenende gestellt und die über ihrer Spitze befindliche heisse Luft in die Röhre geblasen; die Wirkung auf die empfindliche Flamme war deutlich. Dieselbe Wirkung trat ein, wenn die Luft, die aus dem rothglühenden Eisen aufstieg, in die Röhre geblasen wurde.

Im letzteren Falle blieb die Röhre optisch klar, während dieselben Wirkungen, wie beim Harz, Rauch und Dampf beobachtet wurden. Sicher haben wir kein Recht, ohne weitere Prüfung dem künstlichen Nebel eine Wirkung zuzuschreiben, die der ihn begleitenden Luft zukommen kann.

Nachdem wir gefunden haben, dass meist bei Ausschluss des Nebels die nicht homogene Luft wirksam ist, so wird unsere Schlussreihe vollständig, wenn wir nachweisen, dass bei Ausschluss der Wärme der Nebel unwirksam ist.

Anstatt der Röhre *tt'* (Fig. 157) wurde ein Schrank mit Glaswänden von 1 m Länge, $^2/_3$ m Breite und ungefähr $1^1/_2$ m Höhe mit Dämpfen verschiedener Art gefüllt. Hier blieben die Dämpfe so lange, bis die Unterschiede der Temperatur ausgeglichen waren. Zwei Oeffnungen wurden in den beiden gegenüberstehenden Glasplatten gemacht, die 1 m von einander entfernt waren.

Vor der einen Oeffnung wurde die Glocke in ihrem gepolsterten Kasten aufgestellt und hinter die andere Oeffnung, in einiger Entfernung von ihr, die empfindliche Flamme.

In den verschlossenen Schrank wurde eine Schale gestellt, auf der auf Wasser entzündeter Phosphor schwamm. Der Rauch war so dicht, dass weit weniger als der eine Meter, den der Schall durchmaass, die helle Kerzenflamme ganz auslöschte. Zuerst war eine schwache Wirkung des Rauches auf den Schall wahrzunehmen, dann verschwand diese schnell und die Bewegung der empfindlichen Flamme wurde nicht mehr davon beeinflusst, als wenn der Schall durch reine Luft gegangen wäre. Die erste Wirkung war augenscheinlich den Verschiedenheiten der Temperatur zuzuschreiben, und sie verschwand, als die Temperatur sich ausgeglichen hatte.

Der Schrank wurde dann mit den dichten Dämpfen von Schiesspulver gefüllt. Zuerst trat eine schwache Wirkung ein, diese verschwand aber noch schneller, als beim Phosphor, der Schall ging hindurch, als ob gar kein Rauch da wäre. Weniger als eine halbe Minute genügte, um die Wirkung beim Phosphor zu vernichten, aber wenige Secunden beim Schiesspulver. Diese Dämpfe waren mehr als genügend, um das Licht der Kerzenflamme zu ersticken.

Der dichte Rauch von Harz übte gar keinen Einfluss auf den Schall aus, nachdem die Temperatur ausgeglichen war.

Die Dämpfe von Mastix waren gleichfalls unwirksam.

Die Dämpfe von Zinnchlorid, obgleich von ausserordentlicher Dichtigkeit, machten keinen besonderen Eindruck auf den Schall.

Dann erfüllten besonders dichte Dämpfe von Sal-

miak den Schrank. Ein Theil der Strecke, durch den der Schall ging, genügte, um das Licht einer Kerzenflamme auszulöschen. Bald nachdem der Schrank gefüllt war, ging der Schall ohne die geringste Schwächung hindurch. Eine Oeffnung oben am Schrank wurde geöffnet; obgleich eine dichte Rauchsäule aus ihr aufstieg, vergingen doch mehrere Minuten, ehe die Kerzenflamme durch den allmählich dünner werdenden Nebel gesehen werden konnte.

Es wurde aus einem kupfernen Kessel sehr viel Dampf in den Schrank gelassen, so dass er mit einer dicken Wolke erfüllt war. Keine Wolke ist in der Natur jemals so dick, und doch ging der Schall ohne die geringste Schwächung hindurch. Da dies der Fall ist, so sind Wolkenechos nicht wahrscheinlich.

Wurden in allen diesen Fällen im Schrank, der die Dämpfe enthielt, ein Paar Bunsen'sche Brenner angezündet, so wurde in einer Minute die Luft so ungleichartig, dass die empfindliche Flamme vollständig beruhigt wurde.

Spätere Versuche zeigten, dass diese akustisch wirksamen Nebel selbst für das elektrische Licht undurchdringlich waren.

So gehen Versuch und Beobachtung Hand in Hand, und beweisen, dass Nebel keinen besonderen Einfluss auf den Schall haben. Da hiermit die Anschauung, dass sie undurchdringlich seien, eine Anschauung, die die Einführung der Schallküstensignale so lange verzögerte, beseitigt ist, so haben wir begründete Hoffnung, dass die Unfälle, die durch Nebel und schweres Wetter hervorgerufen wurden, in Zukunft sich bedeutend vermindern werden.

§. 7. Wirkung des Windes.

Wir wurden oft bei stürmischem Wetter von unserem Dampfer im Stich gelassen, der in den Downs oder in Margate Roads Schutz suchen musste, und dann wurde die Gelegenheit benutzt, um die Wirkung des Windes zu bestimmen.

Am 11. October ging ich, von Herrn Douglas und von Herrn Edwards begleitet, die Klippen von Dover Castle nach dem Foreland zu entlang, während der Wind heftig dem Schall entgegen blies. Etwa 2,4 km vom Foreland entfernt, hörten wir zuerst den schwachen, aber deutlichen Ton der Sirene. Der Schall des Hornes war unhörbar. Eine Kanone, die, während wir Halt machten, abgefeuert wurde, wurde ebenfalls nicht gehört.

Als wir uns dem Foreland näherten, sahen wir den Rauch einer Kanone. Herr Edwards hörte einen schwachen Knall, aber weder Herr Douglas noch ich konnten das Geringste hören. Der Ton der Sirene war zur gleichen Zeit von durchdringender Intensität. Wir warteten 10 Minuten, bis eine andere Kanone abgefeuert wurde. Der Rauch war zu sehen und ich glaubte, einen schwachen Knall zu hören, war aber nicht ganz sicher. Meine Gefährten hörten nichts. Als wir nachher die Entfernung abschritten, fanden wir, dass sie nur 500 m betrug. Wir waren zur Zeit sowohl gegen die Sirene, wie gegen die Kanone durch eine kleine Erhöhung beschattet, dies konnte aber für das vollständige Verschwinden des Schalls der Kanone in so geringer Entfernung nicht in Betracht kommen, und noch dazu zu einer Zeit, wo uns die Sirene einen Ton von so gewaltiger Kraft zusandte.

Herr Ayres ging auf meinen Wunsch windwärts der Klippe entlang, während Herr Douglas weiter nach St. Margarets Bay ging. Während ihrer Abwesenheit liess ich drei Kanonen abfeuern. Herr Ayres hörte nur eine von ihnen. Durch den Wind begünstigt, hörte Herr Douglas in der doppelten Entfernung, und obgleich er weit tiefer in dem Schallschatten stand, alle drei Knalle mit der grössten Deutlichkeit.

Mit Herrn Douglas wieder vereint, setzten wir unseren Weg bis zu einer Entfernung von 1,21 km jenseits St. Margarets Bay fort. Hier, wo wir mit dem mit ungeschwächter Gewalt blasenden Winde gegangen waren, drang der Schall der Sirene mit ausserordentlicher Kraft bis zu uns[1]). An dieser Stelle hörten wir auch die Kanone laut und zwei andere laute Schüsse in dem richtigen Intervall von 10 Minuten, als wir vom Foreland zurückkamen.

Die Kanone am 11. October wurde fünf Mal gehört und hätte wohl 15 Mal gehört werden müssen, sowohl gegen den Wind als windwärts.

Die Kürze des Schalls der Kanone ist in windigem Wetter ein grosses Hinderniss für ihre Benutzung als Signal. Beim Horn und bei der Sirene hat die Aufmerksamkeit Zeit, sich auf den Schall zu richten, und ein einzelner Windstoss, wenn er auch einen Theil des Schalls abschneidet, vernichtet ihn nicht ganz. Aber ein solcher Windstoss kann dem nur einen Augenblick dauernden Schall der Kanone verderblich sein.

Auf der dem Winde abgewendeten Seite des Foreland wurde am 23. October der Schall wenigstens vier

---

[1]) Das Horn wurde zu dieser Zeit nicht angeblasen, wäre aber zweifellos gut gehört worden.

Mal so weit gehört, als auf der Windseite, und nach beiden Richtungen besass die Sirene die grösste durchdringende Kraft.

Am 24. ging der Wind nach O.S.O. über und der Schall, der bei W.S.W.-Wind Dover nicht erreichen konnte, wurde nun in den Strassen durch dichten Regen hindurch gehört. Am 27. war der Wind O.N.O. In unserem Arbeitszimmer im Lord Warden Hôtel, in den Schlafzimmern und auf der Treppe erreichte uns mit überraschender Kraft der Schall der Sirene, das Pfeifen und Klagen des Windes durchdringend, der durch Dover nach Folkestone blies. Herr Edwards und ich hörten den Schall 19,6 km vom Foreland auf der Folkestone Strasse, und hätten die Instrumente dann nicht aufgehört zu arbeiten, so hätte man sie wohl noch weiter gehört. Auf dem South Sand Head-Leuchtschiff, 6 km auf der anderen Seite, hatte man den ganzen Tag hindurch keinen Ton gehört. Als am 28. der Wind von N.O. kam, wurde der Schall in der Mitte von Folkestone in einer Entfernung von 12,8 km gehört, während er in der entgegengesetzten Richtung nicht 6 km erreichen konnte. Am 29. waren die Grenzen seines Umkreises Eastware Bay auf der einen Seite und Kingsdown auf der anderen; am 30. waren die Grenzen Kingsdown auf der einen Seite und Folkestone Pier auf der anderen. Bei einer Windstärke von 4 oder 5 konnte man sehr oft den Schall in einer Richtung drei Mal so weit hören, als in der anderen. Nach diesen von mir erhaltenen Resultaten, die wahrscheinlich an Zahl, Mannigfaltigkeit und Bestimmtheit alle früher erhaltenen übertreffen, kann ich den Einfluss des Windes auf den Schall nicht leicht unterschätzen.

Lange blieb die hier beschriebene Wirkung des

Windes räthselhaft. Ich erinnere mich sehr wohl, gehört zu haben, wie Sir John Herschel — der Verfasser der damals wichtigsten Abhandlung über den Schall — seine Verwunderung aussprach über die Verschiedenheit in der Schallstärke der Kirchenglocken von Hawkhurst, je nachdem die Richtung des Schalls mit der Richtung des Windes übereinstimmte oder ihr entgegengesetzt war. Er schüttelte mit dem Kopfe zum Zeichen, dass die Frage noch ungelöst sei. Indess war im Jahre 1857 die Schwierigkeit der Lösung der Frage durch Professor Stokes überwunden worden.

Seine Erklärung ist folgende: Beim Winde ist die Fortbewegung der Luft nahe an der Oberfläche der Erde langsamer als in einiger Entfernung über derselben, da die Luft durch die Reibung an der Erde und durch ihre innere Reibung zurückgehalten wird. Die momentane Lage eines kleinen Theiles (d. h. der gleichzeitig von der Bewegung ergriffenen Theilchen) einer Schallwelle, die sich gegen den Wind nahe der Erde bewegt, sei durch eine verticale Linie dargestellt. Der oberste Theil der Welle, der am weitesten von der Erdoberfläche entfernt ist, wird durch die bewegte Luft mehr als der unterste Theil zurückgetrieben, da diesem ein Wind von geringerer Geschwindigkeit entgegen weht. Die Welle hört daher bald auf, vertical zu stehen, da ihr oberer Theil sich nach rückwärts biegt. Nun erfolgt die fortschreitende Bewegung einer Schallwelle immer im rechten Winkel zu ihrer Vorderseite und eine kurze Ueberlegung zeigt, dass eine Welle, deren Vorderseite der Wind in der beschriebenen Weise zurück biegt, nicht horizontal fortschreiten, sondern schräg aufwärts steigen wird.

Es ergab sich, dass der experimentelle Beweis dieser Theorie weit leichter zu geben war, als man zuerst

dachte; wir verdanken Professor Osborne Reynolds denselben. Seine Schallquelle war eine kleine elektrische Glocke, die gehoben und gesenkt werden konnte. Läutete er sie in windigem Wetter und wandte sich windwärts, so fand er, dass in einer bestimmten Entfernung die Schallwellen über seinem Kopfe fortgingen, genau so, wie es in Stokes' Theorie angegeben war. Er fand auch, dass, wenn er die Glocke hob, ihr Schall weiter gegen den Wind gehört wurde, als wenn sie nahe dem Boden stand. Ich habe selbst viele Versuche in dieser Richtung in Wimbledon Common gemacht und die Resultate von Professor Reynolds richtig befunden. Es wurde eine Anordnung getroffen, bei der eine Glocke durch eine Winde vom Boden bis auf 3 m Höhe gezogen werden konnte. Sie wurde durch einen Schlag zum Tönen gebracht, dessen Stärke durch eine in gewisser Weise gespannte Feder bestimmt wurde, ein Beobachter zog sich so weit windwärts zurück, bis er den Schall nicht mehr hörte. Dann wurde die Glocke gehoben und wieder angeschlagen. Der Schall wurde augenblicklich gehört, das Heben der Glocke hatte in gewisser Weise das Aufsteigen der Schallwellen neutralisirt. Auf einer Leiter, die auf der Gemeindeweide aufgestellt wurde, konnte ich meinen Kopf bis auf 3 bis $3^1/_2$ m über den Boden erheben. Ich stellte die Leiter windwärts, die Glocke wurde geläutet und rückwärts getragen, bis dass ein Ohr, das an den Boden gelegt war, nichts mehr hörte. Beim Steigen auf die Leiter fanden sich die abgelenkten Wellen wieder, und der Schall wurde deutlich hörbar. Diese Resultate wurden durch Versuche bestätigt, die in grösserem Maassstabe in der Pagode von Kew Gardens ausgeführt wurden.

Es ist klar, dass jede andere Ursache, die einen

Unterschied der Bewegung in den verschiedenen Theilen einer Schallwelle erzeugt, eine ähnliche Wirkung wie der Wind hervorrufen wird. Professor Osborne Reynolds erkannte, dass Verschiedenheiten der Temperatur hier mit ins Spiel kommen können. Nimmt man z. B. an, dass die Luft dicht an der Erdoberfläche wärmer als über derselben ist, so bewegt sich das Ende der Schallwelle nahe am Boden in stillem Wetter rascher, als die Theile der Welle, die etwas höher über demselben liegen. Auf solche Weise neigt sich eine anfänglich verticale Welle und schreitet in Folge ihrer schiefen Richtung wie beim entgegen kommenden Winde schräg nach aufwärts fort. Die von Professor Osborne Reynolds hier erwähnte Ursache ist sicher vorhanden, doch, hoffe ich, wird er mich entschuldigen, wenn ich nicht in allen Fällen mich den Erklärungen anschliesse, die er auf sie gründet.

§. 8. Atmosphärische Auswahl.

Man hat behauptet, dass die Atmosphäre an verschiedenen Tagen verschiedene Töne besonders gut fortpflanzt. Diese Beobachtung verdient eine eingehendere Behandlung.

Nach dem heftigen Regenschauer, der am 18. October über uns hinging, nahm der Schall aller Instrumente, wie schon berichtet wurde, ungemein an Stärke zu; aber es wurde beobachtet, dass der Schall des Hornes, der tiefer als der der Sirene war, am meisten zunahm; zeitweise kam seine Stärke nicht nur der seines Rivalen gleich, sondern übertraf sie sogar. Daraus könnte man schliessen, dass der durch den Regen verursachte Wechsel der Atmosphäre die Durchlässigkeit für lange Tonwellen besonders erhöhte.

Unser Programm gestattet uns, uns nicht nur mit Schlüssen zu begnügen. Es war an dem obigen Tage angeordnet worden, dass die Sirene bis 3 Uhr 30 Minuten Nachmittags 2400 Umdrehungen in der Minute machen sollte, also 480 Wellen in der Secunde erzeugen. So lange dies eingehalten wurde, hatte das Horn nach dem Regenschauer das Uebergewicht. Dann wurde die Zahl der Umdrehungen auf 2000 in der Minute oder 400 Wellen in der Secunde erniedrigt, und sogleich überwog der Schall der Sirene den des Hornes. So war eine klare Beziehung zwischen der Stärke der Luftreflexion und der Länge der Schallwellen festgestellt.

Da man die 25 cm lange Canadische Pfeife so einrichten konnte, dass sie Töne von verschiedener Höhe erzeugte, so machte ich am 10. October mit einer Reihe ihrer Töne Beobachtungen. Der höchste schien grosse Intensität und durchdringende Kraft zu besitzen. Der Glaube ist allgemein verbreitet, dass ein Ton dieser Art (der einen nahestehenden Beobachter heftig, ja peinlich berührt) auch am weitesten gehört werde. Herr A. Gordon sagte 1845 in seinem Bericht vor der Commission der Leuchtthürme Folgendes: „Ein schriller, hoher Ton der Tonleiter wird viel weiter getragen, als ein tiefer Ton in der Tonleiter.“ Dieselbe Meinung habe ich auch von anderen Gelehrten aussprechen hören.

Am 14. October unterwarfen wir die Frage einer experimentellen Prüfung. Es war bestimmt worden, dass die Canadische Pfeife, die am 10. mit so schriller Intensität gehört worden war, bis 11 Uhr 30 Minuten Morgens ihren höchsten Ton ausstossen sollte. Zu der angegebenen Stunde waren wir neben der Varne Boje, $12^1/_2$ km vom Foreland. Als wir uns der Boje näherten, hörten wir die Sirene trotz des Geräusches der Ruder,

die Hörner wurden auch gehört, aber schwächer als die Sirene. Wir hielten an der Boje an und warteten auf den Kanonenschuss von 11 Uhr 30 Minuten. Sein Schall wurde von Allen gehört. Die schrilltönende Canadische Pfeife wurde weder vor noch während der Pause auch nur ein einziges Mal gehört. Um die angegebene Zeit wurde sie so eingestellt, dass sie ihren gewöhnlichen tiefen Ton gab, der sogleich gehört wurde. Weiter heraus war der tiefe Ton der Kanone noch immer hörbar, nachdem jeder andere Ton aufgehört hatte.

Aber nur während des ersten Theiles des Tages zeigte sich diese Bevorzugung der längeren Wellen. Um 3 Uhr Nachmittags waren die Verhältnisse vollständig andere, denn da wurde die hochgestimmte Sirene gehört, während alle anderen Töne unhörbar waren. Wir hatten an vielen anderen Tagen Gelegenheit, die wechselnde Stärke des Schalls zwischen der Sirene und der Kanone zu beobachten. Am 9. October war bald der eine, bald der andere vorherrschend. Am Morgen des 13. wurde die Sirene deutlich auf der Shakespeare Klippe gehört, während zwei Kanonen, deren Blitze man deutlich sah, vollkommen unhörbar waren. Am 16. October, 3,2 km von der Signalstation, war der Schall der Kanone um 11 Uhr dem der Sirene weit untergeordnet, aber man hörte beide. Als um 12 Uhr 30 Minuten die Entfernung 9,6 km betrug, war die Kanone ganz unhörbar, während man die Sirene schwach hörte. Der Versuch wurde noch zweimal später am Tage wiederholt. Der Blitz der Kanone wurde jedes Mal gesehen, aber nichts gehört. Beim letzten Versuch, als der Ton der Kanone erstickt war, stiess die Sirene einen so starken Ton aus, dass er sich durch alles Geräusch der Räder geltend machte. Der Tag war ersichtlich für den Durchgang der langen Tonwellen ungünstig.

Der 17. October begann mit einer Bevorzugung der kürzeren Wellen. Um 11 Uhr 30 Minuten Morgens war die Herrschaft der Sirene über die Kanone ausgesprochen; um 12 Uhr 30 Minuten überwog die Kanone die Sirene ein wenig; auch um 1 Uhr, 2 Uhr und 2 Uhr 30 Minuten Nachmittags behauptete die Kanone das Uebergewicht. Am 18. October dauerte diese Bevorzugung der längeren Wellen fort. Am 20. October begann der Tag zu Gunsten der Kanone, dann wurden beide gleich und zuletzt behauptete die Sirene die Oberhand; der Tag war aber stürmisch geworden, und ein Sturm ist immer für die Wahrnehmung des kurzen Kanonenschalls ungünstig. Dieselbe Bemerkung bezieht sich auf die Versuche vom 21. October, in der Entfernung von 10,4 km, als die Sirene sich trotz der Geräusche des Windes, des Meeres und der Räder Gehör verschaffte, wurde die Kanone abgefeuert; obgleich wir aber mit gespanntester Aufmerksamkeit hinhörten, konnten wir keinen Ton vernehmen. Eine halbe Stunde später fanden wir dasselbe Resultat. Am 24. October sahen fünf Beobachter das Aufblitzen der Kanone in einer Entfernung von 8 km, hörten aber nichts; alle unter ihnen hörten aber in dieser Entfernung die Sirene deutlich; ein zweiter Versuch an demselben Tage ergab dasselbe Resultat. Am 27. war die Sirene auch Siegerin, und bei drei verschiedenen Gelegenheiten am 29. war ihre Herrschaft über die Kanone ebenfalls sehr entschieden. Solche Versuche zwingen zu neuen Anschauungen über die Zerstreuung des Schalls in der Atmosphäre.

§. 9. Schlussbemerkungen.

Einige wenige noch hinzuzufügende Bemerkungen und Schlussfolgerungen werden passend dieses Capitel

abschliessen. Es war bewiesen worden, dass bei gewissen Witterungsverhältnissen die Haubitze, wenn sie mit dreipfündiger Ladung abgefeuert wurde, einen grösseren Raum beherrscht, als die Pfeifen, Trompeten oder die Sirene. Dies war z. B. an jenem besonderen Tage, dem 17. October, der Fall, an dem der Bereich aller Töne sein Maximum erreichte.

Indess hatte sich an vielen anderen Tagen die Unterordnung der Kanone unter die Sirene in der klarsten Weise gezeigt. Die Blitze der Kanone wurden mit der grössten Deutlichkeit am Foreland gesehen, aber kein Ton wurde dort gehört, während uns der Schall der Sirene zur selben Zeit deutlich und mit bedeutender Kraft erreichte.

Die Nachtheile der Kanone sind folgende:

a) Die Dauer des Tones ist so kurz, dass, wenn der Beobachter nicht vorher vorbereitet ist, der Schall möglicher Weise in Folge eines Mangels an Aufmerksamkeit noch mehr als durch seine Schwäche ungehört bleiben kann.

b) Die Möglichkeit, dass er durch einen localen Ton erstickt werden kann, ist so gross, dass er zuweilen durch einen Windstoss, der zur Zeit seiner Ankunft das Ohr trifft, vernichtet wird. Arago erwähnt diesen Punkt in seinen berühmten Versuchen im Jahre 1822. Durch einen solchen Stoss wird eine momentane Lücke in den continuirlichen Schall gerissen, aber keine vollständige Auslöschung.

c) Die Möglichkeit, dass er durch einen entgegenkommenden Wind erstickt oder abgelenkt werden kann, so dass er in geringer Entfernung windwärts praktisch nutzlos wird, ist sehr merkwürdig. Es wird ein Fall angeführt, wo man die Kanone in einer Entfernung von

500 m vom Orte des Abfeuerns nicht mehr gegen den heftigen Wind hören konnte, während der Ton der Sirene zur selben Zeit mit grosser Intensität gehört wurde.

Ich denke aber doch, dass trotz dieser Nachtheile die Kanone berechtigt ist, in der Reihe der erstclassigen Signale zu stehen. Ich selbst habe Gelegenheit gehabt, ihren grossen Nutzen in Holyhead und auf dem Kish Leuchtschiff bei Kingstown zu beobachten. Die Capitäne der Holyhead Schiffe sind überdiess einig in dem Lobe der Kanone. Ein wichtiges Moment zu ihren Gunsten ist noch die Thatsache, dass oft im Nebel der Blitz oder das Aufleuchten dem Schall zu Hülfe kommt; ein Punkt, dessen Bedeutung ohne Weiteres klar ist.

Es kann Fälle geben, wo die Verbindung der Kanone mit anderen Signalen wünschenswerth sein kann. Wo man einer Nebelsignalstation eine nicht misszuverstehende Individualität geben will, könnte man mit Vortheil eine solche Verbindung anwenden.

Will man die Kanone als ein Nebelsignal beibehalten (und ich würde mich schwer dazu entschliessen, jetzt ihre vollständige Abschaffung vorzuschlagen), so müsste sie von der geeignetsten Construction sein. Unsere Versuche zeigen, dass der Schall der Kanone von ihrer Form abhängt; aber wir wissen nicht, ob wir die beste Form angewendet haben. Dieses führt auf die Nothwendigkeit, eine Kanone mit besonderer Rücksichtnahme auf die Erzeugung des Schalls zu construiren.

Noch wichtiger als die Form der Kanone ist die Qualität des Pulvers. Ein scharfer Anstoss ist nothwendig, um eine Schallwelle zu erzeugen; ein schnell brennendes Pulver ist daher das geeignetste. Schiessbaumwolle oder Dynamit übertreffen das Schiesspulver als Schallerzeuger.

Kein einziges der der Prüfung unterworfenen Instrumente hatte an allen Tagen über die andern das Uebergewicht; doch waren unsere Beobachtungen so zahlreich und so lange andauernd, dass wir zu dem Schluss kommen konnten, dass sicher im Ganzen die Dampfsirene das mächtigste Nebelsignal ist, das bis jetzt in England versucht worden ist. Sie ist besonders wirksam, wenn locale Geräusche übertönt werden sollen, als die des Windes, des Takelwerkes, der brechenden Wellen, der Brandung und des Rasselns der Kiesel. Ihre Mächtigkeit, Qualität, Tonhöhe und ihre durchdringende Kraft lassen sie noch alle andern Geräusche übertönen, wenn schon alle anderen Signaltöne ihnen unterlegen sind.

Ich habe daher nicht gezögert, die Einführung der Sirene als Küstensignal zu empfehlen.

Es wäre in jedem Falle wünschenswerth, dem Instrument eine Rotationseinrichtung zu geben, die es der Person, die es versorgt, möglich macht, ihre Trompete gegen den Wind oder in jede andere erforderliche Richtung zu drehen. Diese Einrichtung wurde am South Foreland getroffen und bietet mechanisch keine Schwierigkeiten. Es ist auch wünschenswerth, die Sirene so hoch aufzustellen, dass man ihrer Trompete eine Depression von 15 oder 20° unter den Horizont geben kann.

Wenn man den Platz aussucht, auf dem ein Nebelsignal aufgestellt werden soll, so muss die Frage des möglichen Einflusses eines Schallschattens und die Möglichkeit des Auslöschens des Schalls durch die Interferenz der directen Wellen mit den Wellen, die das Ufer reflectirt, ernstlich in Betracht gezogen werden. Vorhergehende Versuche werden in den meisten Fällen nöthig sein, ehe man genau den Punkt bestimmt, auf dem das Instrument aufgestellt werden soll.

Kein bis jetzt geprüftes Nebelsignal vermag der Bedingung zu genügen, die in einem früher angeführten Briefe ausgesprochen worden ist, nämlich, „dass alle Nebelsignale unter allen äusseren Bedingungen wenigstens auf $6^1/_2$ km deutlich gehört werden müssen“. Es können Umstände eintreten, die den mächtigsten Schall hindern, bis auf die halbe Entfernung gehört zu werden. Was mit Gewissheit ausgesprochen werden kann, ist, dass man in fast allen Fällen mit Sicherheit in einer Entfernung von 3,2 km auf die Sirene rechnen kann; in der grössten Mehrzahl der Fälle kann man sich bis auf 5 km Entfernung auf sie verlassen, und in der Mehrzahl der Fälle bis über 5 km.

Glücklicher Weise stimmen die bis jetzt gemachten Versuche vollkommen darin überein, dass zu den Zeiten, wo besonders Nebelsignale nöthig sind, die Luft, in der der Nebel suspendirt ist, in sehr homogenem Zustande ist; daher ist es in höchstem Grade wahrscheinlich, dass wir uns beim Nebel darauf verlassen können, dass die Signale noch in grösseren als in den angegebenen Entfernungen hörbar sind.

Ich möchte nicht den Seefahrer in eine Sicherheit wiegen, die trügerisch sein könnte. Wenn er ein Nebelsignal hört, so soll er als allgemeine Regel (auf jeden Fall wenigstens, bis eine genaue Prüfung das Gegentheil beweist) annehmen, dass die Schallquelle nicht mehr als 3 oder 5 km entfernt sei, und sein Loth auswerfen oder alle anderen nöthigen Vorsichtsmaassregeln ergreifen. Sollte er sich jemals in der Abschätzung der Entfernung irren, so dürfte es nur nach der Seite sein, nach der die grösste Sicherheit liegt.

Ich glaube, dass mit den jetzt zu unserer Verfügung stehenden Instrumenten, falls sie richtig an den Küsten

entlang vertheilt werden, das gerettete Eigenthum in zehn Jahren weit die nothwendigen Auslagen der Einrichtung dieser Signale überstiegen haben wird. Die Rettung von Menschenleben wendet sich an höhere Beweggründe der Menschlichkeit.

Professor Faraday, mein vortrefflicher Vorgänger, spricht in einem Bericht, der über die Nebelsignale für das Trinity House geschrieben wurde, die Meinung aus, dass ein trügerisches Versprechen schlimmer für den Seefahrer sein würde, als gar keins. Werfen wir einen Blick rückwärts auf die hier erwähnten Beobachtungen, so finden wir, dass die Ausbreitung des Schalles an klaren Tagen zwischen 4 und 26 km schwankt. Es ist klar, dass eine Instruction, die sich auf die letztere Beobachtung begründete, mit Gefahren bei einem Wetter verbunden wäre, die der ersteren entspräche. Es sollte nicht das Maximum, sondern das Minimum der Ausbreitung des Schalls dem Seefahrer angegeben werden. Mangel an Beachtung dieses Punktes kann von verderblichen Folgen sein.

Diese Bemerkung machte ich nicht ohne Grund. Ich habe vor mir eine „Mittheilung an Schiffer“, die eine Nebelpfeife betrifft, die kürzlich auf dem Cap Race aufgestellt worden ist und die im Rufe steht, dass sie in ruhigem Wetter eine Ausbreitung von 32 km, mit dem Winde von 50 km, und im Sturm oder bei conträrem Winde von 11 bis 16 km hat. Betrachten wir nun die Entfernung, die der Schall in unseren Beobachtungen erreichte, so will ich gern die Möglichkeit zugeben, dass in einer homogeneren Atmosphäre, als die unsere, die Ausbreitung des Schalls einer gewaltig starken Pfeife an einigen stillen Tagen 32 km und an einigen schwach windigen Tagen 50 km sein kann; aber ich

habe die feste Ueberzeugung, dass die Angabe dieser Entfernungen oder der Entfernung von 11 bis 16 km bei conträrem Sturm ohne nähere Begründung den Schiffer mit einem falschen Vertrauen erfüllt. Ich möchte behaupten, dass man am Cap Race stille Tage finden könnte, in denen die Ausbreitung des Schalls weniger als ein Drittel von derjenigen sein möchte, was diese Mittheilung angiebt. Solche Publicationen sollten ohne jede Spur von Uebertreibung sein und nur Data angeben, auf die sich der Schiffer mit vollem Vertrauen verlassen kann. Meine Absicht, als ich diese Beobachtungen über einen so langen Zeitraum ausdehnte, war es, Allen zu beweisen, wie trügerisch es sein würde und wie verderblich es sein könnte, wollte man allgemeine Schlüsse aus Beobachtungen ziehen, die bei Wetter von grosser akustischer Durchlässigkeit gemacht worden sind.

So endet wenigstens für jetzt eine Untersuchung, die, wie ich überzeugt bin, sowohl wissenschaftlich als auch praktisch von einiger Bedeutung sein wird. Ich kann mir nur Glück wünschen, dass ich bei derselben durch die andauernde Hülfe und Mitarbeit der „Elder Brethern of Trinity House“ unterstützt wurde. Capitän Drew, Capitän Close, Capitän Were, Capitän Atkins und der deputy master haben alle von Zeit zu Zeit an der Untersuchung Theil genommen. Dem eminenten arktischen Seefahrer, Admiral Collinson, der die ganze Zeit hindurch unwandelbares, ja ich möchte sagen philosophisches Interesse an der Untersuchung zeigte, bin ich für seine sehr werthvolle praktische Hülfe verpflichtet. Er war fast immer neben mir, verglich seine Ansichten mit den meinen, legte den Dampfer in die erforderlichen Lagen und machte mit vollendeter Geschicklichkeit und Geschwindigkeit die nothwendigen Sextantenbeobachtungen.

Ich bin auch für die wichtigen Dienste sehr verbunden, die mir Herr Douglas, der geschickte und unermüdliche Ingenieur, Herr Ayres, der Hülfsingenieur, und Herr Prix Edwards, damaliger Privatsecretär des deputy master des Trinity House, geleistet haben.

Auch den Officieren und den Kanoniren des South Foreland gebührt mein wärmster Dank, ebenso Herrn Holmes und Herrn Laidlow, die die Sorge für die Trompeten, Pfeifen und die Sirene übernommen hatten.

In der nachfolgenden experimentellen Behandlung des Gegenstandes wurde ich sehr geschickt von meinem vortrefflichen Assistenten Herrn John Cottrell unterstützt.

Anmerkung: Im Anhang befindet sich ein kurzer Aufsatz über „Akustische Umkehrbarkeit", in dem die neuerdings hinzugekommenen Versuche beschrieben werden. Dort finden sich auch zwei Fälle von akustischer Undurchlässigkeit beschrieben, die zu den merkwürdigsten bisher beobachteten gehören.

Uebersicht der siebenten Vorlesung.

Die siebente Vorlesung enthält einen Bericht über die Untersuchungen über die akustischen Eigenschaften der Atmosphäre mit Rücksicht auf die Frage der Verwendung der Nebelsignale und über die im Laboratorium angestellten Versuche, die durch diese Untersuchungen veranlasst waren.

Zuerst ist der frühere Stand der Frage behandelt worden, dann folgt eine Beschreibung der Instrumente und Hülfsmittel, die im Jahre 1873 auf dem South Foreland aufgestellt wurden, um eine erschöpfende Untersuchung durchführen zu können. Die Untersuchung wurde auf Kosten der Regierung ausgeführt und unter dem Schutze der „Elder Brethern vom Trinity House".

Zuerst ergaben sich die widersprechendsten Resultate. Am 19. Mai 1873 war der Bereich des Schalles 5,3 km, am 20. war er 8,8 km, am 2. Juni 9,6 km, am 3. mehr als 14 km, am 10. 14 km, am 25. 9,6 km, am 26. 15 km, am 1. Juli 20,5 km, am 2. 6,5 km, während er am 3. bei klarer, ruhiger Atmosphäre und stiller See weniger als 5 km betrug.

Man konnte beweisen, dass diese Widersprüche zum grossen Theil durch den Zustand der Luft bedingt waren, die in derselben Beziehung zum Schall stand, wie Gewölk zum Licht. Durch Ströme von Luft, die verschiedene Temperatur haben oder in verschiedenem Maasse mit Wasserdampf gesättigt sind, wird die Atmosphäre gleichsam trübe für den Schall.

In der That schweben oder fliegen akustische Wolken unaufhörlich durch die Luft. Sie haben nichts mit gewöhn-

lichen Wolken, Nebel oder Dunst zu thun. Die durchsichtigste Atmosphäre kann von ihnen erfüllt sein; sie können Tage von ausserordentlicher optischer Durchlässigkeit in Tage von ebenso ausserordentlicher akustischer Undurchlässigkeit verwandeln.

Die bisher angenommene Beziehung zwischen einer klaren Atmosphäre und der Weite der Fortpflanzung des Schalls ist daher nicht vorhanden.

Der Schall wird durch wiederholte Reflexionen in der akustischen Wolke vernichtet, wie das Licht durch wiederholte Reflexionen in einer gewöhnlichen Wolke vernichtet wird. Und wie das von einer gewöhnlichen Wolke reflectirte Licht das Auge erreicht, so erreicht der Schall von einer vollkommen unsichtbaren akustischen Wolke das Ohr.

So kann man Luftechos von ausserordentlicher Intensität und langer Dauer hervorrufen. Sie kommen, der bisherigen Ansicht entgegen, in der klarsten Luft vor.

Die Existenz dieser Luftechos ist sowohl durch die Beobachtung, als auch durch den Versuch nachgewiesen worden. Sie können entweder von verschieden erhitzten Luftströmen oder von verschieden mit Dampf gesättigten Luftströmen herrühren.

Regen kann den Schall nicht merklich aufhalten.

Hagel kann den Schall nicht merklich aufhalten.

Schnee kann den Schall nicht merklich aufhalten.

Nebel kann den Schall nicht merklich aufhalten.

Luft, die mit Nebel erfüllt ist, ist im Allgemeinen sehr homogen und der Fortpflanzung des Schalls günstig. Die Ansichten, die man bisher über die Wirkung des Nebels hatte, sind unhaltbar.

Versuche mit künstlichen Schauern von Regen, Hagel und Schnee und mit künstlichen Nebeln von ausserordentlicher Dichtigkeit bestätigen die Resultate der Beobachtung.

So lange die Luft ein continuirliches Medium bildet, ist die Menge des Schalls, der durch die in ihr schwebenden kleinen Theilchen zerstreut wird, ausserordentlich klein.

Dies wird durch die Leichtigkeit bewiesen, mit der der

Schall durch Lagen von Cattun, Baumwolle, Seide, Flanell und Filz geht. Er geht leicht durch alle diese Substanzen von so grosser Dichtigkeit hindurch, die doch für das Licht der Sonne undurchlässig sind.

Er geht nur wenig geschwächt z. B. durch sechs Lagen von feiner Seide; er findet seinen Weg durch eine Lage von dickem Filz von 1 cm Dicke und er wird nicht vollständig von 200 Lagen von Baumwollennetz aufgehalten.

Die Atmosphäre übt eine auswählende Absorption auf die Schallwellen aus, die von Tag zu Tag, ja von Stunde zu Stunde wechselt. Sie ist bisweilen der Fortpflanzung der langen, und zu anderen Zeiten der Fortpflanzung der kürzeren Schallwellen günstig.

Die anerkannte Wirkung des Windes ist durch meine Beobachtungen bestätigt worden.

Diese Wirkung wird durch die Theorie von Professor Stokes erklärt, die zuerst durch Versuche von Professor Osborne Reynolds bestätigt wurde.

Achte Vorlesung.

Gesetz der schwingenden Bewegungen in Wasser und Luft. — Superposition der Schwingungen. — Interferenz und Coincidenz der Tonwellen. — Aufhebung von Ton durch Ton. — Combinirte Wirkung zweier fast im Einklange befindlicher Töne. — Theorie der Schwebungen. — Optische Darstellung des Princips der Interferenz. — Zunahme der Intensität durch Auslöschung eines Theiles der Schwingungen. — Schallfreie Zonen von Duane. — Combinationstöne. — Bedingungen ihrer Erzeugung. — Erläuterung durch Versuche. — Differenztöne und Summationstöne. — Theorien von Young und Helmholtz.

---

§. 1. Interferenz von Wasserwellen.

Bei ruhigem Wetter habe ich im Hafen von Cowes oftmals von einem Boote aus beobachtet, wie sich Masten und Taue der Schiffe im Wasser spiegelten. Das Abbild der Taue verrieth den Zustand der Wasseroberfläche; lange und breite Unregelmässigkeiten zeigten den Durchgang grösserer Wellen, kürzere Einschnitte die kleinen Kräuselungen an, welche wie Parasiten über die Oberfläche der grösseren Wogen dahinliefen. Die See vermochte sich den Anforderungen aller dieser Wellenschwankungen, ob gross oder klein, anzupassen. Auch wenn ich die Oberfläche mit meinem Ruder berührte oder die Tropfen von demselben in das Wasser fallen liess, fand sich noch Raum für die winzigen so entstehenden Wellen. Diese Gliederung der Wasserfläche

in Wellen und Kräuselungen ging weit über die Grenze meines Gesichtsfeldes hinaus; jede Welle und jede kleine Kräuselung behauptete ihren Platz und das Recht auf ihr eigenes Dasein inmitten der Menge anderer Bewegungen, welche das Wasser erregten.

Das Gesetz, welches dieser Jagd der Wogen, diesem Sichkreuzen und Ineinandermischen der unzähligen Wellen zu Grunde liegt, lautet: die resultirende Bewegung jedes Wassertheilchens ist die Summe der demselben mitgetheilten individuellen Bewegungen. Wenn auf irgend ein Wassertheilchen im gleichen Moment von zwei Seiten her ein Anstoss erfolgt, der es zu heben strebt, so wird es von einer Kraft gehoben, welche gleich der Summe von beiden Anstössen ist. Wenn zwei Stösse stattfinden, von denen der eine danach strebt, das Theilchen zu heben, der andere es niederzudrücken, so wird die Wirkung gleich der Differenz zwischen beiden Stössen sein. Spreche ich also von der Summe der Bewegungen, so meine ich die algebraische Summe, und betrachte diejenigen Bewegungen, welche das Theilchen zu heben suchen, als positiv, diejenigen, welche es niederzudrücken suchen, als negativ.

Wirft man zwei Steine in einiger Entfernung von einander in ruhiges Wasser, so bildet sich um jeden Stein eine Reihe von sich ausdehnenden kreisförmigen Wellen, deren jede einzelne aus einem Kamm und einer Furche besteht. Die Wellen kreuzen sich, berühren sich und zerschneiden die Oberfläche in kleine Erhöhungen und Vertiefungen. Wo Kamm mit Kamm zusammentrifft, wird das Wasser zu doppelter Höhe gehoben; wo Furche mit Furche zusammentrifft, wird es zu doppelter Tiefe niedergedrückt. Wo Kamm und Furche zusammentreffen, wird das Wasser auf seine gewöhnliche Höhe zurückgeführt. Die resul-

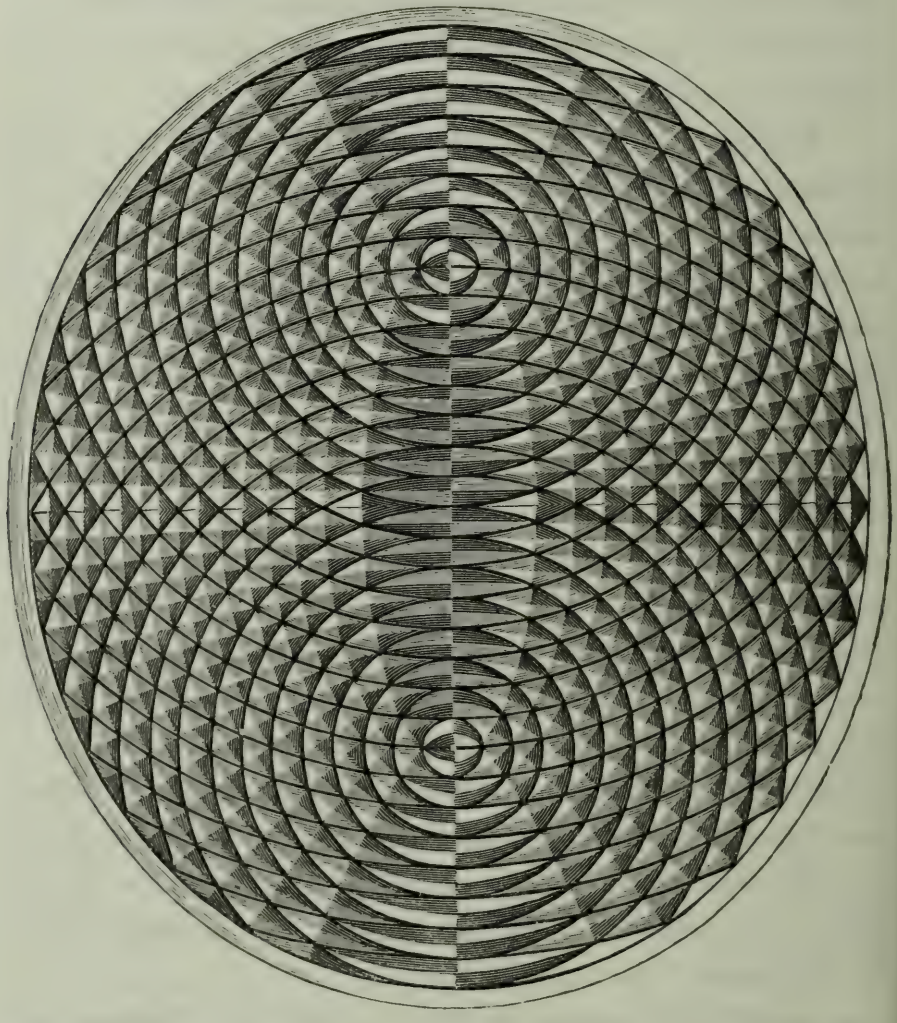
tirende Bewegung an jedem Punkte des Wassers ist, wie bereits gesagt wurde, die algebraische Summe der Bewegungen, welche auf diesen Punkt einwirken. Und wenn, anstatt zweier Erregungspunkte, ihrer 10 oder 100 oder 1000 wären, so bliebe die Wirkung dieselbe. Das wirkliche Resultat kann über unser Beobachtungsvermögen hinausgehen, allein das oben gegebene Gesetz würde sich dennoch bewähren.

Statt von zwei verschiedenen Erregungsmittelpunkten auszugehen, können auch directe und reflectirte Wellen von einem Punkte ausgehen und sich gegenseitig durchkreuzen. Viele von Ihnen werden wissen, wie schön es aussieht, wenn Licht von einer leicht gekräuselten Wasserfläche zurückgeworfen wird. Bei Quecksilber ist die Wirkung noch schöner. Wenn man die directen und reflectirten Wellen in passender Weise erregt, können sie sich kreuzen und in einander winden, und durch eine wunderbare Selbstanalyse ihre verwickelten Knoten wieder entwirren. Fig. 162 (a. f. S.), die der „Wellenlehre“ der Brüder Weber entnommen ist, wird Ihnen einen Begriff von der Schönheit dieser Wirkungen geben. Sie stellt das Wogen vor, welches entsteht, wenn sich directe und reflectirte Wellen in einem runden Gefässe durchschneiden; der Erregungspunkt, welcher durch den kleinsten Kreis auf der Figur angedeutet ist, liegt hier gerade in der Mitte zwischen dem Centrum und dem äusseren Rande des Gefässes.

Auch Luft besitzt die Eigenschaft des Wassers, die verschiedensten Eindrücke aufzunehmen und fortzupflanzen. Sie gewährt jeder beliebigen Anzahl von Tonwellen Raum zur Bewegung. Dieselbe Luft ist im Stande, die Schwingungen von 1000 Instrumenten zu gleicher Zeit zu empfangen und fortzuführen. Unsere

Einbildungskraft versagt, wenn wir den Versuch machen, uns eine solche Bewegung der Luft anschaulich zu machen, dem geistigen Auge, so zu sagen, diese directen und zurückgeworfenen Wellenstösse vorzuführen. Dennoch

Fig. 162.



bleibt inmitten dieser Verwickelungen das oben angegebene Gesetz stehen: jedes Lufttheilchen gehorcht einer resultirenden Bewegung, welche die algebraische Summe aller ihm mitgetheilten individuellen Bewegungen ist. Am Wunderbarsten aber ist es, dass das menschliche Ohr,

obwohl nur ein Luftcylinder von der Dicke eines Federkieles auf dasselbe einwirkt, dennoch im Stande ist, die Bestandtheile der Bewegung wahrzunehmen, ja selbst, durch einen Act der Aufmerksamkeit, jeden einzelnen Ton aus diesem luftigen Gewirr zu unterscheiden.

§. 2. Interferenz des Schalls.

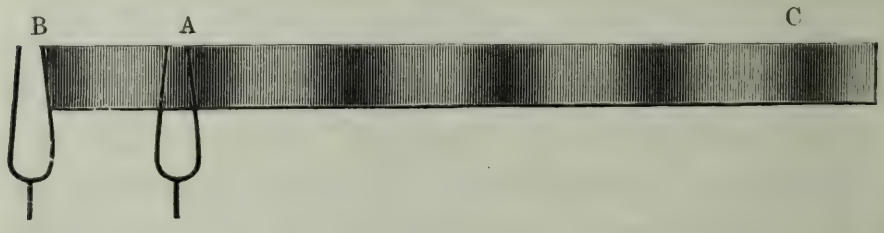
Wenn zwei gleichgestimmte Gabeln gleichzeitig ertönen, so können sie offenbar so schwingen, dass die Verdichtungswellen der einen mit den Verdichtungswellen der anderen zusammenfallen, ebenso wie die Verdünnungswellen der einen mit denen der anderen. Ist dies der Fall, so werden sich die beiden Stimmgabeln gegenseitig unterstützen. Die verdichteten Stellen werden sich stärker verdichten, die verdünnten Stellen stärker verdünnen, und da die Tonstärke von der Dichtigkeitsdifferenz zwischen Verdichtungen und Verdünnungen abhängt, so werden die beiden schwingenden, sich gegenseitig unterstützenden Stimmgabeln einen viel intensiveren Ton hervorbringen, als wenn jede Gabel allein vibrirte.

Beide Stimmgabeln können aber auch in einem solchen Verhältniss zu einander stehen, dass die eine da Verdichtung hervorbringt, wo die andere Verdünnung bewirkt; dass eine Stimmgabel die Lufttheilchen vorwärts drängt, während die andere sie zurück treibt. Sind die sich bekämpfenden Kräfte gleich, so werden die so angetriebenen Lufttheilchen sich weder vorwärts noch rückwärts bewegen; es tritt Ruhe der Luft und damit Stille ein. So ist es möglich, indem man den Ton einer Stimmgabel zu dem einer anderen hinzufügt, die Töne beider auszulöschen. Es ist dies eine Erschei-

nung, welche deutlicher als irgend eine andere die Wellenbewegung charakterisirt. Diese Erscheinung führte in der Optik zur Wellentheorie des Lichtes, bei der gleichfalls der Hauptbeweis darin liegt, dass wir Dunkelheit hervorbringen können, indem wir Licht zu Licht fügen.

Während eine Stimmgabel schwingt, wird die Entfernung zwischen ihren beiden Zinken abwechselnd grösser und kleiner. Wir wollen die Bewegung, welche die Entfernung vergrössert, die Schwingung nach aussen, die, welche sie verkleinert, die Schwingung nach innen nennen. Nehmen wir an, dass die beiden

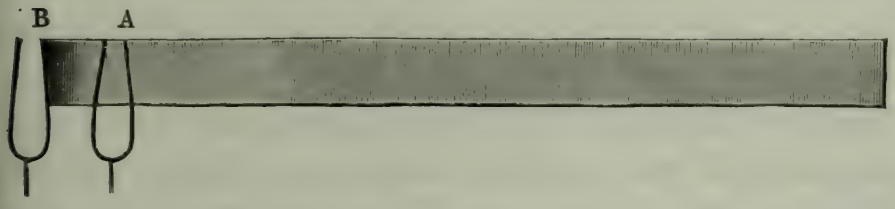
Fig. 163.



Stimmgabeln A und B die Grenzen ihrer Schwingung nach aussen und innen gleichzeitig erreichen. In diesem Falle sind die Phasen ihrer Bewegung, um mich eines technischen Ausdruckes zu bedienen, dieselben. Der Einfachheit halber wollen wir unsere Aufmerksamkeit auf die rechts befindlichen Zinken A und B (Fig. 163) der beiden Gabeln beschränken und die beiden anderen Zinken ausser Acht lassen; und nun fragen wir uns, welches die Entfernung zwischen den Zinken A und B sein muss, damit die Verdichtungen und Verdünnungen der beiden, die hier durch hellere und dunklere Schattirung angedeutet sind, zusammenfallen? Man wird sofort einsehen, dass, wenn die Entfernung von B zu A gleich der Länge einer ganzen Tonwelle ist, Coincidenz

zwischen den beiden Wellensystemen eintreten muss. Dasselbe wird offenbar stattfinden, wenn die Entfernung zwischen *A* und *B* zwei, drei oder vier, kurz jede Anzahl von ganzen Wellenlängen beträgt. In allen solchen Fällen wird Coincidenz der beiden Wellensysteme, und in Folge dessen Verstärkung des Tones der einen Stimmgabel durch den Ton der anderen eintreten. Sowohl die Verdichtungen als die Verdünnungen zwischen *A* und *C* sind in diesem Falle ausgeprägter, als sie es sein würden, wenn man eine der Gabeln weg liesse.

Fig. 164.



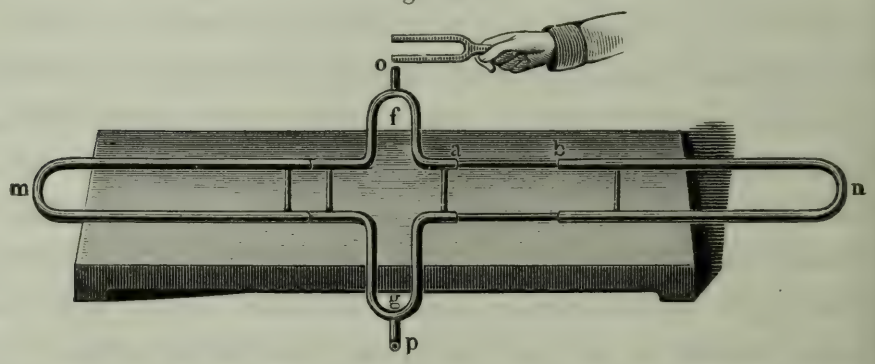
Allein, wenn die Zinke *B* nur um eine halbe Wellenlänge von *A* absteht, was wird dann geschehen? Offenbar werden alsdann die Verdünnungen des einen Systems mit den Verdichtungen des anderen zusammentreffen, die Luft rechts von *A* wird zur Ruhe gebracht werden, wie dies in Fig. 164 gezeigt ist, wobei gleichförmige Schraffirung anzeigt, dass weder Verdichtungen noch Verdünnungen stattfinden. Wenn *B* zwei halbe Wellenlängen hinter *A* zurückbleibt, so verstärken sich, wie bereits gesagt, die Wellen gegenseitig; folgt *B* nach drei halben Wellenlängen, so vernichten sie sich. Oder, allgemein ausgedrückt, wir haben Verstärkung oder Vernichtung, je nachdem die Entfernung zwischen den zwei Gabelzinken eine gerade oder ungerade Zahl von halben Wellenlängen beträgt. Genau dasselbe findet bei den Lichtwellen statt. Wenn aus irgend einer Ursache ein

System von Aetherwellen um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen hinter einem anderen System zurück bleibt, so unterstützen sich die beiden Systeme, wenn sie sich vereinigen, und wir haben mehr Licht. Folgt jedoch ein System in irgend einer ungeraden Zahl von halben Wellenlängen auf das andere, so bekämpfen sie sich gegenseitig, und das Licht wird in Folge dessen vernichtet. Diese Wirkung nennt man sowohl bei Schall wie bei Licht Interferenz.

§. 3. Erläuterungen durch den Versuch.

Sir John Herschel machte zuerst den Vorschlag, einen Strom von Tönen in zwei Theile von verschiedener Länge zu theilen, welche sich dann später wieder vereinigen und mit einander interferiren sollten. Dieser Gedanke ist kürzlich mit Erfolg von Quincke aus-

Fig. 165.



geführt und durch König noch weiter ausgebildet worden. Fig. 165 wird das Princip dieses Versuches sofort anschaulich machen. Die Röhre *of* theilt sich bei *f* in zwei Zweige, deren einer um *n*, der andere um *m* geführt wird. Beide Zweige werden bei *g* wieder vereinigt und endigen in einen gemeinschaftlichen Canal *gp*. Der Theil *bn* der Röhre, welcher über *ab* hingleitet,

kann, wie die Figur zeigt, ausgezogen werden. Auf diese Weise können die Tonwellen in den beiden Zweigen über verschiedene Entfernungen geleitet werden. Bringt man eine schwingende Stimmgabel an *o* und das Ohr an *p*, so werden, wenn die beiden Seitenzweige gleich lang sind, die Tonwellen aus beiden das Ohr zu gleicher Zeit erreichen, und der Ton der Stimmgabel wird hörbar sein. Zieht man *ab* aus, so wird schliesslich ein Punkt erreicht, wo der Ton der Gabel erlischt. Dies tritt ein, wenn die Entfernung *ab* ein Viertel von einer Tonwelle beträgt; oder mit anderen Worten, wenn der ganze rechte Zweig eine halbe Wellenlänge länger ist als der linke. Zieht man *bn* noch weiter aus, so wird der Ton wieder hörbar, und wenn die doppelte Entfernung *ab* eine ganze Wellenlänge beträgt, so erreicht der Ton sein Maximum. Je nachdem also der Längenunterschied der beiden Zweige eine halbe oder eine ganze Wellenlänge beträgt, haben wir Verstärkung oder Vernichtung der beiden Serien von Tonwellen. Bei Ausführung des Versuches ist die Röhre *of* so weit zu verlängern, bis der directe Ton der Stimmgabel nicht mehr gehört wird. Alsdann wird die Aufmerksamkeit des Ohres völlig auf die Töne concentrirt, welche ihm durch die Röhre zukommen.

Es ist klar, dass man die Wellenlänge jedes einfachen Tones mittelst dieses Instrumentes sehr leicht bestimmen kann. Man braucht nur den Wegunterschied festzustellen, welcher vollkommene Interferenz herbeiführt. Das Doppelte dieses Unterschiedes ist die Wellenlänge; und wenn die Anzahl der Schwingungen zugleich bekannt ist, so kann man daraus unmittelbar die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft berechnen.

Jede der beiden vor Ihnen befindlichen Stimm-

gabeln führt genau 256 Schwingungen in der Secunde aus; wenn sie zusammentönen, sind sie in vollkommenem Einklange. Ich belaste nun die eine derselben mit einem Stückchen Wachs und bewirke dadurch, dass sie sich etwas langsamer bewegt, als die andere. Das Wachs soll die Zahl der Schwingungen auf 255 in der Secunde vermindern. Wie werden ihre Wellen nun auf einander wirken? Fangen sie gleichzeitig an zu tönen, so dass sich Verdichtung mit Verdichtung, Verdünnung mit Verdünnung deckt, so ist es klar, dass dieser Zustand nicht andauern kann. Bei der 128sten Schwingung werden sich ihre Phasen in vollkommenstem Gegensatze befinden, indem die eine der anderen um eine halbe Wellenlänge voraus ist. Hier erzeugt die eine Stimmgabel eine Verdichtung, wo die andere eine Verdünnung erzeugt; die Folge ist, dass die beiden Gabeln sich an diesem bestimmten Punkte gegenseitig völlig neutralisiren. Von diesem Punkte an jedoch unterstützen sich die Stimmgabeln gegenseitig mehr und mehr, bis am Ende einer Secunde, wenn die eine ihre 255ste, die andere ihre 256ste Schwingung vollendet hat, der Zustand wieder eben so ist, wie am Anfange. Verdichtung coincidirt alsdann wieder mit Verdichtung, und Verdünnung mit Verdünnung, so dass wieder die volle Wirkung beider Töne auf das Ohr zu Stande kommt.

Es ist klar, dass wir unter solchen Umständen nicht den fortdauernden Fluss vollkommenen Einklanges haben können. Wir haben im Gegentheil ein abwechselndes An- und Abschwellen des Tones, nämlich dasjenige, was die Musiker „Schwebungen“ oder „Schläge“ nennen. Diese Schwebungen sind, wie oben erklärt wurde, eine Wirkung der Interferenz.

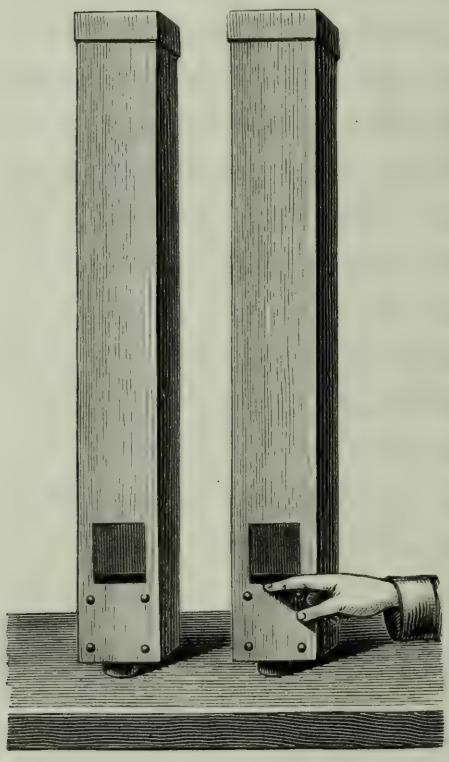
Wenn ich die eine Gabel nun mit einer Kupfermünze noch schwerer belaste, so folgen sich die Coincidenzen und Interferenzen rascher als zuvor, und wir haben eine viel schnellere Reihenfolge von Schwebungen. Bei unserem letzten Versuche vollführte eine Gabel eine Schwingung mehr in der Secunde, als die andere, und wir hatten innerhalb dieser Zeit nur eine Schwebung. Im gegenwärtigen Falle vibrirt eine Gabel 250 Mal, die andere 256 Mal in der Secunde, und wir haben sechs Schwebungen innerhalb einer Secunde. Bei einigem Nachdenken wird es klar werden, dass eine Schwebung innerhalb des Zeitabschnittes stattfinden muss, dessen eine Gabel bedarf, um eine Schwingung mehr auszuführen, als die andere; und da in dem vorliegenden Falle sechs solcher Zeitabschnitte innerhalb einer Secunde erfolgen, so müssen sechs Schwebungen während der Zeit eintreten. Kurz, die Zahl der Schwebungen in der Secunde ist immer gleich der Differenz zwischen den beiden Schwingungszahlen.

§. 4. Interferenz der Wellen von Orgelpfeifen.

Alle tönenden Körper können Schwebungen hervorbringen. Diese zwei langen Orgelpfeifen geben z. B. gewaltige Schwebungen, wenn sie gleichzeitig angeblasen werden, weil die eine etwas länger ist als die andere. Hier sind zwei andere Pfeifen, welche jetzt vollkommen zusammenstimmen, da sie genau gleich lang sind. Allein ich brauche nur meinen Finger an die Mündung der einen Pfeife (Fig. 166, a. f. S.) zu bringen, um ihre Schwingungszahl zu verringern und laute, rasche Schwebungen hervorzubringen. Auch wenn ich meine Hand an die obere Oeffnung der Pfeife halte, verringere

ich die Schwingungszahl und erzeuge Schwebungen, welche sich um so rascher folgen, je mehr ich die Oeffnung der Pfeife schliesse. Durch einen stärkeren Luftstrom bringe ich die beiden ersten Obertöne der Pfeifen hervor. Auch diese höheren Töne interferiren, und Sie hören schnelle Schwebungen.

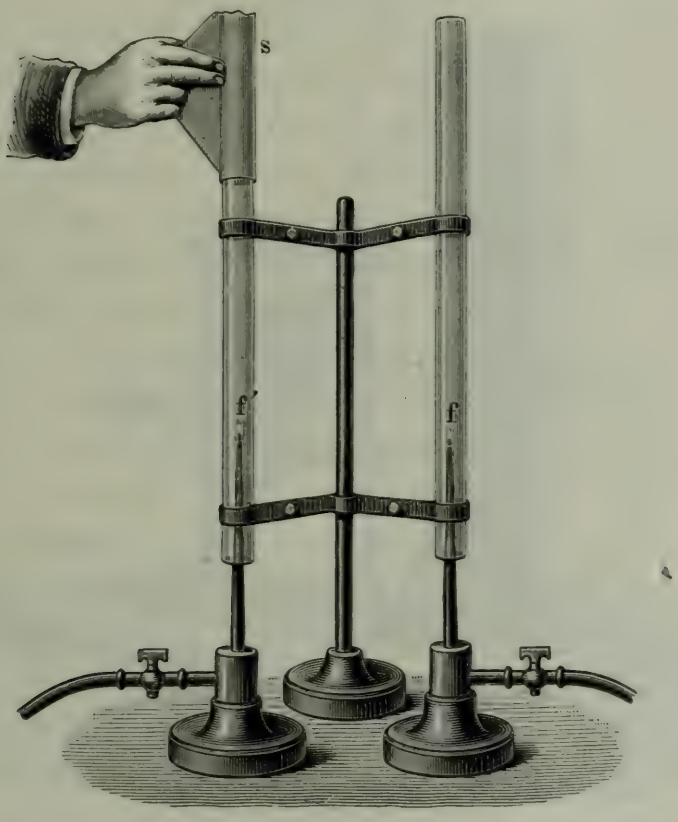
Fig. 166.



Singende Flammen geben die schönste Erläuterung für diese Erscheinung. Sie haben zwei solche Flammen vor sich; die Röhren, welche dieselben umgeben, sind mit teleskopischen Schiebern versehen (Fig. 167). Augenblicklich finden keine Schwebungen statt, weil die Röhren nicht hinreichend nahe im Einklange sind. Wenn ich aber die kürzere Röhre allmählich verlängere, indem ich ihren Schieber ausziehe, so hört man rasche Schwebungen. Jetzt werden sie langsamer, jetzt noch langsamer, und jetzt singen beide Flammen in völligem Einklange. Wenn ich den Schieber noch weiter ausziehe, so wird die eine Röhre zu lang. Die Schwebungen fangen wieder an und werden rascher, bis sie schliesslich so schnell auf einander folgen, dass das Ohr sie nur noch als rauhes Dröhnen empfindet. Sie bemerken, wie die Flammen im Tacte mit den Schwebungen innerhalb ihrer Röhren tanzen. Diese Schwebungen bringen,

wie gesagt, eine schweigende Flamme innerhalb einer Röhre zum Zittern; hat die Stimme die richtige Höhe und ist die Stellung der Flamme günstig gewählt, so wird sie durch die Schwebungen zum Singen gebracht. Mit den Flammen grosser Rosenbrenner und mit Zinnröhren von 90 cm bis 2,70 m Länge erzielen wir,

Fig. 167.



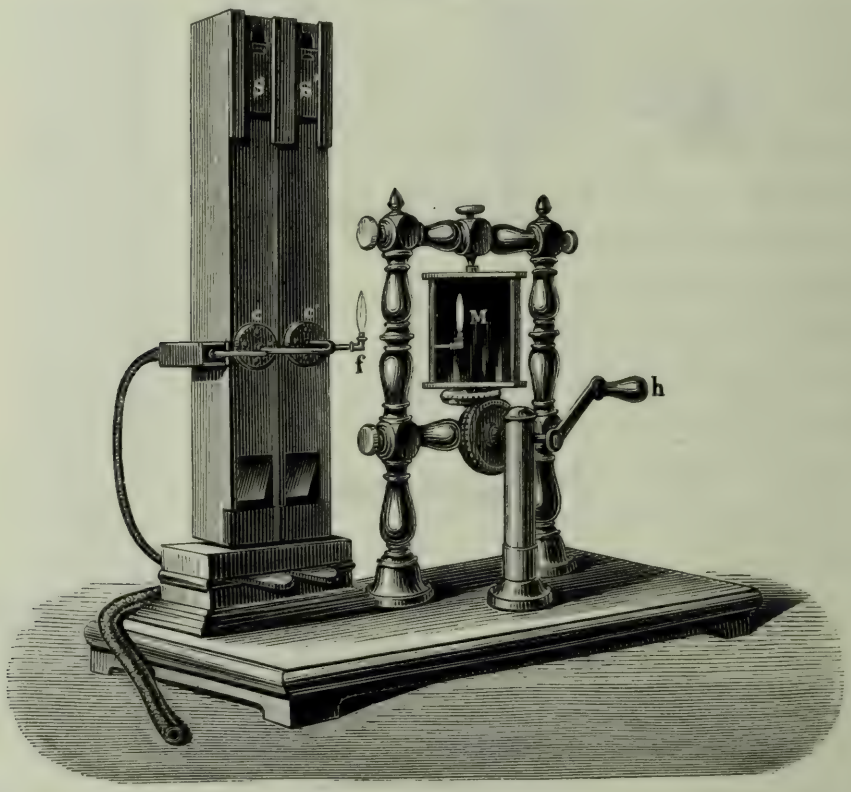
wie Sie bemerken, Schwebungen von ausserordentlicher Kraft.

Sie haben soeben die Schwebungen gehört, welche zwei beinahe gleichgestimmte Orgelpfeifen hervorbringen. Zwei ähnliche Pfeifen stehen vor Ihnen (Fig. 168 a. f. S.); jede derselben ist jedoch in der Mitte mit einer Membran versehen, welche auf eine Flamme einwirken soll[1]). Zwei

[1]) Beschreibung in der fünften Vorlesung.

kleine Röhren gehen von den durch die Membran geschlossenen Stellen aus und vereinigen sich später, so dass die Membranen beider Orgelpfeifen mit derselben Flamme in Verbindung stehen. Mittelst der Schieber *ss'* oben an den Pfeifen können diese nach Belieben in Einklang oder Dissonanz gebracht werden.

Fig. 168.



Augenblicklich stimmen sie nicht zusammen, und ihre Schwebungen erfolgen mit grosser Geschwindigkeit, während die mit den Membranen verbundene Flamme im Tacte nach den Schwebungen tanzt. Ich bringe sie nunmehr zum Einklange; die Schwebungen werden langsam, und die Flamme lässt periodisch ihr Licht verschwinden und wieder aufleuchten; ein Vorgang, der an denjenigen des Ein- und Ausathmens erinnert. Wenn man den Spiegel *M*

jetzt dreht, so bringt die Flamme einen leuchtenden Streifen auf dem Schirme hervor. Derselbe ist an gewissen Stellen zusammenhängend, meistens aber in gesonderte Flammenbilder zerlegt. Die zusammenhängenden Stellen entsprechen den Perioden der Interferenz, während derer die beiden Wellenzüge sich gegenseitig vernichten.

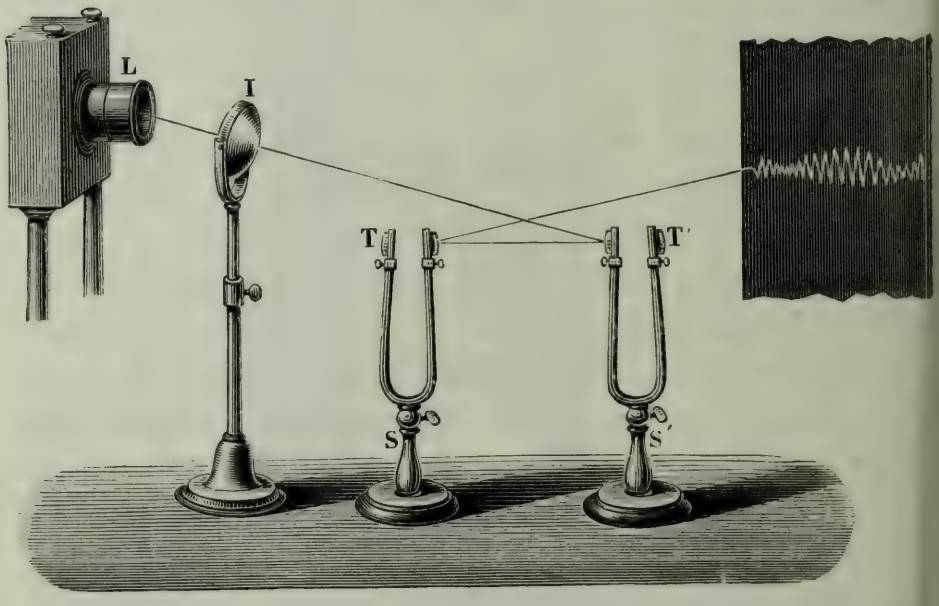
Statt beide Pfeifen auf eine Flamme einwirken zu lassen, können wir mit jeder Pfeife eine Flamme verbinden. Das Verhalten der Flammen ist alsdann sehr lehrreich. Nehmen wir an, beide Flammen befänden sich in derselben verticalen Linie, so dass die eine genau unter der anderen stände. Bringen wir die Pfeifen in Einklang und drehen den Spiegel, so zerlegen wir jede Flamme in eine Kette von Bildern; allein die Bilder der einen Flamme passen genau in die Zwischenräume der Bilder von der anderen. Die Perioden des Erlöschens der einen Flamme fallen also mit den Perioden des Wiederaufleuchtens der anderen zusammen. Der Versuch beweist, dass, wenn zwei gleichgestimmte Pfeifen in dieser Weise einander nahe gebracht werden, ihre Schwingungen in entgegengesetzten Phasen stattfinden. Hieraus folgt, dass die zwei Schwingungssysteme sich beständig gegenseitig neutralisiren, so dass man in einer kleinen Entfernung von den Pfeifen ihren Grundton nicht mehr unterscheiden kann. Aus diesem Grunde gereicht es einer Orgel nicht zum Vortheil, wenn man mehrere Pfeifen von derselben Tonhöhe dicht neben einander anbringt.

§. 5. Lissajous' Erläuterung der Schwebungen von zwei Stimmgabeln.

Bei den Schwebungen erreicht die Amplitude der Luftschwingungen periodisch ein Maximum und ein Minimum.

Vermittelst der schönen Methode von Lissajous können wir diese abwechselnde Ab- und Zunahme sichtbar machen. Wenn ich eine grosse Stimmgabel T' (Fig. 169) gegenüber der elektrischen Lampe L aufstelle, fällt ein leuchtender Strahl auf den Spiegel, wird dann auf den Spiegel der zweiten Stimmgabel T reflectirt und von da auf den Schirm zurückgeworfen, wo er eine glänzende

Fig. 169.



Scheibe bildet. Streiche ich mit dem Bogen über die Gabel T', so wird der Strahl, wie bei dem Versuche in unserer zweiten Vorlesung, auf und ab bewegt, so dass die Scheibe auf dem Schirme zu einem 90 cm langen leuchtenden Streifen wird. Wenn ich dadurch, dass ich meinen Bogen über die zweite Gabel ziehe, die Schwingungen in übereinstimmende Phasen bringe, so wird der Streifen verlängert; sind die Phasen entgegengesetzt, so wird die eine Gabel die andere ganz oder theilweise neutralisiren. Zufällig verstärkt hier die zweite Gabel die Wirkung der ersten, so dass der Lichtstreifen jetzt

1,20 m lang wird. Ich habe diese Gabeln so vollkommen als möglich gestimmt, so dass jede von ihnen genau 64 Schwingungen in der Secunde ausführt; das ursprüngliche Verhältniss ihrer Phasen bleibt demzufolge constant, und deshalb bemerken Sie ein allmähliches Kürzerwerden des Lichtstreifens, wie bei dem Erlöschen der Schwingungen einer einzelnen Stimmgabel. Der Lichtstreifen schwindet allmählich zu der ursprünglichen Scheibe zusammen, welche bewegungslos auf dem Schirme bleibt.

Ich belaste nun die Zinke der einen Gabel mit einer Kupfermünze und verringere dadurch ihre Schwingungsperiode. Die Phasen der beiden Gabeln können jetzt nicht mehr in constantem Verhältniss zu einander bleiben. Eine Gabel überholt die andere, und demgemäss werden ihre Phasen zuweilen coincidiren, zuweilen aber auch sich bekämpfen. Beobachten Sie die Wirkung. Im gegenwärtigen Augenblicke verstärken sich die beiden Gabeln, und wir haben einen 1,20 m langen, leuchtenden Streifen auf dem Schirme. Dieser zieht sich langsam zu einer blossen Scheibe zusammen; allein die Wirkung hält nur an, so lange die Phasen einander vollkommen entgegengesetzt sind. Sobald dieser Augenblick vorüber ist, fangen die Gabeln wieder an, sich zu unterstützen, und die Scheibe verlängert sich abermals zu einem Streifen. Der Vorgang vollzieht sich sehr langsam. Ich beschleunige ihn, indem ich noch eine Münze auf der bereits belasteten Gabel befestige. Der Lichtstreifen dehnt und verkürzt sich jetzt in ganz regelmässigem Rhythmus. Diese optisch wahrnehmbare Wirkung wird auch der Luft dieses Zimmers mitgetheilt. Die Lufttheilchen ruhen und vibriren abwechselnd; in Folge dessen hört man Schwebungen, welche

mit den Veränderungen der Figur auf dem Schirme Tact halten.

Der Zeitraum, welcher zwischen Maximum und Maximum oder zwischen Minimum und Minimum verstreicht, ist derjenige, den eine Gabel braucht, um eine Schwingung mehr auszuführen als die andere. Jetzt beträgt er ungefähr zwei Secunden. Innerhalb zweier Secunden erfolgt also eine Schwebung. Wenn ich die Dissonanz verstärke, indem ich die Belastung vermehre, so wechseln die rhythmischen Verlängerungen und Verkürzungen schneller und das intermittirende Summen der Gabeln wird deutlicher hörbar. Jetzt erfolgen sechs solcher Verlängerungen und Verkürzungen in dem Zeitraum, welcher vorhin für eine derselben nöthig war, und man hört zugleich drei Schwebungen in der Secunde. Wenn ich die Gabel noch schwerer belaste, so folgen die Abwechslungen so rasch auf einander, dass das Auge sie nicht mehr unterscheiden kann, während die Schwebungen aufhören, einzeln hörbar zu sein, und dem Ohre nur noch als eine Art von Rauhigkeit erscheinen.

Bei den Versuchen mit einer einzelnen Stimmgabel (zweite Vorlesung, Fig. 22) fing ich den Strahl, welchen die Stimmgabel zurückwarf, mit einem Spiegel auf, und indem ich denselben drehte, dehnte sich der leuchtende Strahl auf dem Schirm zu einer langen, wellenförmigen Linie aus. Ich erklärte Ihnen damals, dass die Stärke des Tones von der Tiefe jener Welleneinschnitte abhängig sei. Wenn also der Lichtstreifen von wechselnder Länge auf unserem Schirm in eine wellenförmige Linie ausgezogen wird, so müssen die Einschnitte an einigen Stellen tief sein, während sie an anderen ganz verschwinden. Dies ist der Fall. Ich drehe den Spiegel

der Gabel T (Fig. 169) durch einen kleinen Winkel und erhalte eine bogenförmige Linie, die aus Anschwellungen und Zusammenziehungen besteht (Fig. 170). Die Anschwellungen entsprechen den Perioden des Tönens, die Zusammenziehungen denen der Stille [1]).

Zwei vibrirende Körper, wovon jeder einzelne einen musikalischen Ton hervorzubringen vermag, können sich also gegenseitig neutralisiren, wenn sie gleichzeitig wirken. Wenn wir daher die Schwingungen des einen

Fig. 170.

auslöschen, können wir den Ton des anderen zur Geltung bringen. So geschieht es häufig, dass, wenn zwei Stimmgabeln auf ihrem Resonanzboden im Einklange schwingen, der Ton durch das Verstummen der einen an Stärke zunimmt. Dieser Punkt kann noch weiter erläutert werden durch die in unserer vierten Vorlesung erwähnte schwingende Glocke. Wenn ich ihre Resonanzröhre vor einen Knotenpunkt bringe, hören Sie wohl einen Ton, aber derselbe ist keineswegs so stark, als wenn man die Röhre vor einen Schwingungsbauch bringt. Der Grund hiervon ist, dass die Schwingungen einer Glocke auf den entgegengesetzten Seiten einer Knotenlinie in entgegengesetzten Richtungen verlaufen, und deshalb mit einander interferiren. Wenn ich eine Glasplatte zwischen die Glocke und die Röhre bringe, fange ich

[1]) Diese Figur giebt nur ein schwaches Bild des Thatbestandes. Der Lichtstreifen war 5 cm breit und die Tiefe der Einbiegungen wechselte zwischen 1 m und Null.

die Schwingungen auf einer Seite der Knotenlinie auf, und es erfolgt eine augenblickliche Verstärkung des Tones.

§. 6. Interferenz der Wellen einer schwingenden Scheibe. Erläuterungen von Hopkins und Lissajous.

Bei einer schwingenden Scheibe bewegen sich je zwei an einander stossende Sectoren gleichzeitig, aber in entgegengesetzten Richtungen. Wenn der eine steigt fällt der andere; die Knotenlinie bezeichnet die Grenze zwischen beiden. Sobald daher einer der Sectoren eine Verdichtung in der über ihm befindlichen Luft erzeugt, bringt der anstossende Sector eine Verdünnung in derselben Luft hervor. In Folge dessen wird der Ton des einen Sectors durch den des anderen theilweise vernichtet. Sie werden nunmehr einen Apparat verstehen, durch welchen William Hopkins das Princip der Interferenz erläuterte. Die Röhre AB (Fig. 171) theilt sich bei B in zwei Theile. Das Ende A ist durch eine Membran geschlossen. Wenn ich Sand auf diese Membran streue und die Enden der beiden Theile über zwei an einander stossende Sectoren einer vibrirenden Scheibe halte, ist keine, oder höchstens eine sehr schwache Bewegung des Sandes wahrzunehmen. Bringe ich die Enden der beiden Theile jedoch so über die Scheibe, dass sie einen Sector überspringen, wie in Fig. 171, so wird der Sand von der Membran herabgeworfen; ein Beweis, dass wir in diesem Falle Coincidenz der Schwingungen bei beiden Sectoren haben.

Wir sind jetzt auf einen sehr lehrreichen Versuch vorbereitet, welchen wir Herrn Lissajous verdanken.

Wenn ich mit einem Bogen über den Rand einer Messingscheibe streiche, theile ich diese in sechs schwingende Sectoren. Bringe ich meine Handfläche über einen derselben, so wird der Ton nicht abnehmen, sondern zunehmen. Wenn ich beide Hände über zwei anstossende Sectoren halte, bemerken Sie keine Verstärkung des Tones. Halte ich sie jedoch über abwechselnde Sectoren, wie in Fig. 172, so erfolgt eine deutliche Ver-

Fig. 171.

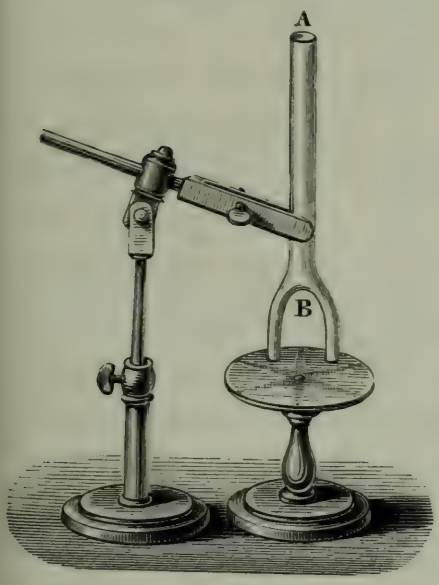
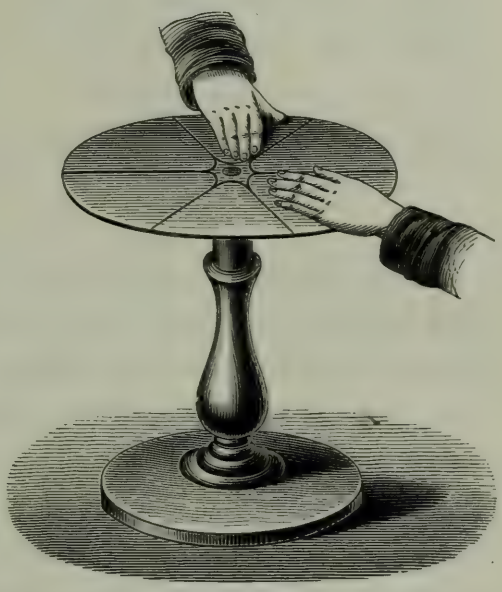


Fig. 172.



stärkung des Tones. Durch einfaches Heben und Senken meiner beiden Hände kann ich diese ausgesprochenen Unterschiede der Intensität hervorbringen. Durch das Annähern meiner Hände fange ich die Schwingungen der zwei Sectoren ab; da ihre Interferenz nach rechts und links aufgehoben wird, tönen die übrigen Sectoren um so lauter. Auch wenn ich eine Hand über der Oberfläche der Scheibe hin und her bewege, werden Sie eine Steigerung und Abschwächung des Tones wahrnehmen. Der Ton steigert sich, wenn meine Hand sich über einem

schwingenden Sector befindet; er wird schwächer, wenn die Hand über einem Knotenpunkte weilt. Indem wir also einen Theil der Schwingungen opfern, steigern wir die Wirkung der übrig gebliebenen. Aehnliche Versuche können mit leuchtender und strahlender Wärme ausgeführt werden. Wenn man von zwei leuchtenden Strahlen, welche sich durch Interferenz gegenseitig vernichten, den einen wegnimmt, so tritt Licht an Stelle von Dunkelheit; und wenn man von zwei interferirenden dunklen Wärmestrahlen den einen auffängt, so tritt Wärme an Stelle von Kälte.

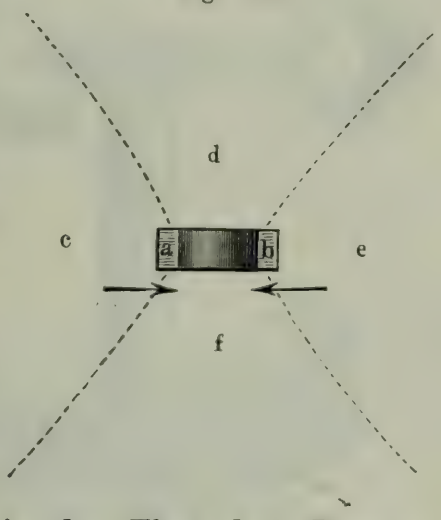
§. 7. Der Ton einer Stimmgabel löscht den einer anderen aus.

Sie werden bemerkt haben, dass eine Stimmgabel fast keinen Ton giebt, wenn man sie frei in der Hand hält. Diese Tonschwäche der Gabel rührt zum grossen Theile von Interferenz her. Die Zinken vibriren immer in entgegengesetzten Richtungen, so dass die eine da eine Verdichtung erzeugt, wo bei der anderen eine Verdünnung stattfindet. Daher wird der Ton vernichtet. Wenn ich einfach eine Röhre aus Pappe über die eine Zinke halte und ihre Schwingungen theilweise auffange, so verstärke ich den Ton. Eine einzelne Zinke ist also wirksamer als beide zusammen. Man kann die Gabel so stellen, dass der Ton der einen Zinke völlig durch den der anderen aufgehoben wird. Diese Stellungen sind leicht zu finden, wenn man die Gabel anschlägt und dann vor dem Ohre um ihre Längsaxe dreht. Wenn der Rücken einer Zinke mit dem Ohre parallel steht, ist der Ton hörbar; ebenso wenn die Seitenflächen der beiden Zinken parallel mit dem Ohre stehen; allein der Ton

wird vollkommen ausgelöscht, wenn die Kante einer Zinke in einer gewissen Stellung dem Ohre vorgehalten wird. Während einer ganzen Umdrehung einer Gabel giebt es vier Stellungen, bei denen der Ton gänzlich verschwindet.

Auf Fig. 173 sollen *a b* die zwei Enden einer aufrecht stehenden Stimmgabel darstellen, welche von oben gesehen wird. Wenn das Ohr nach *c* oder *e* sowie nach *d* oder *f* gebracht wird, ist der Ton hörbar. Längs der vier punktirten Linien jedoch neutralisiren sich die Wellen, welche von den beiden Zinken erzeugt werden, vollständig, und längs dieser Linien wird kein Ton gehört. Weber hat bewiesen, dass diese Linien hyperbolische Curven sind, was in der That dem Principe der Interferenz entspricht.

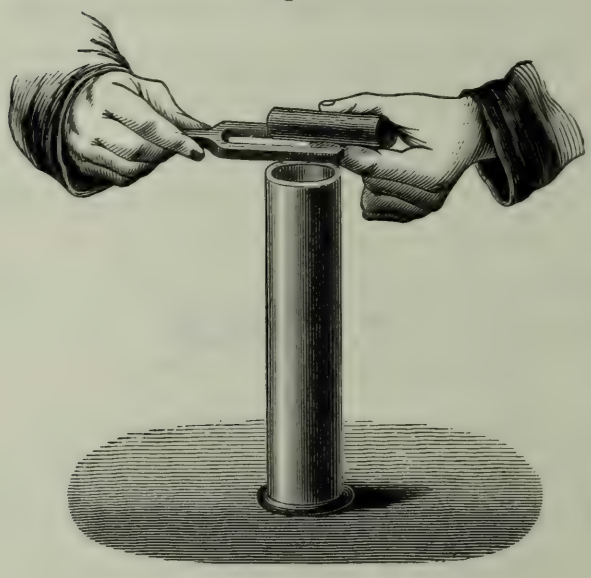
Fig. 173.



Dieses merkwürdige Beispiel von Interferenz, welches zuerst von Thomas Young beobachtet und durch die Brüder Weber gründlich untersucht wurde, kann vermittelst der Resonanz vernehmbar gemacht werden. Wenn ich eine schwingende Gabel über ein Gefäss halte, das mit ihr im Einklang ist, und die Gabel langsam drehe, so entsteht bei vier Stellungen ein lauter Wiederhall; bei vier anderen Stellungen herrscht absolute Stille, während abwechselndes An- und Abschwellen des Tones die Umdrehung der Gabel begleitet. Wenn ich die Gabel mit der Kante nach unten und mit ganz erloschenem Tone über das Gefäss halte und eine Papp-

röhre über eine ihrer Zinken schiebe, wie in Fig. 174, so verkündet eine laute Resonanz, dass die Schwingungen von dieser Zinke fortgenommen sind. Um diese Wirkung zu erzielen, muss die Gabel über die Mitte des Gefässes gehalten werden, so dass die Luft gleichmässig auf beiden Seiten derselben vertheilt ist. Bewegt man die Gabel von der Mitte aus nach einer der Seiten, ohne ihre Inclination im geringsten zu ändern, so erfolgt ein lauter Ton. Aber auch am Rande des Gefässes ist Interferenz möglich. Hält man die Gabel nicht mit der Kante nach unten, sondern beide Zinken in derselben horizontalen Ebene, so findet man bald eine Stelle nahe am Rande des Gefässes, wo jeder Ton erlischt. Wenn man von einer Seite zur anderen über die ganze Oeffnung des Gefässes hinfährt, findet man zwei solcher Stellen.

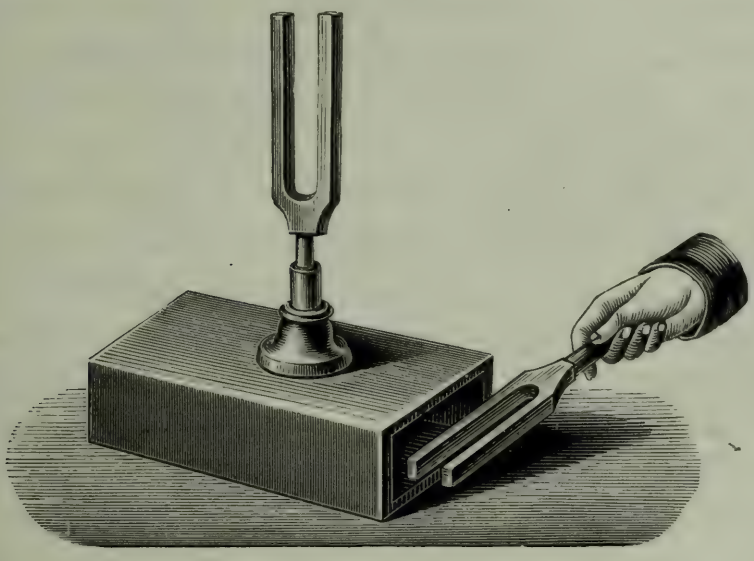
Fig. 174.



Eine Menge verschiedener Versuche, wodurch man die Wirkung der Interferenz erläutern kann, wird sich dem denkenden Geiste darbieten. Es ist zum Beispiel leicht, ein Gefäss zu finden, das die Resonanz für eine schwingende Scheibe giebt. Wenn ein solches Gefäss über einen schwingenden Sector dieser Scheibe gebracht wird, so ist die Resonanz sehr stark, bringt man es über

eine Knotenlinie, so hört die Resonanz plötzlich auf. Wird aber ein Stück Pappe zwischen das Gefäss und die Scheibe gebracht, in der Weise, dass die Schwingungen auf einer Seite der Knotenlinie abgeschnitten werden, so ertönt das Gefäss sofort von den Schwingungen des anderen Sectors. Wenn man ferner zwei Gabeln, welche mit derselben Geschwindigkeit vibriren, über zwei Resonanzgefässe hält, so fliesst der Ton von

Fig. 175.



beiden im Einklange gleichmässig ab. Befestigt man ein Stückchen Wachs auf einer der Gabeln, so hört man mächtige Schwebungen. Entfernt man das Wachs, so stellt sich der Einklang wieder her. Wenn ich eine dieser im Einklange ertönenden Gabeln an einer Spiritusflamme erwärme, so wird dadurch ihre Elasticität verändert; und nun erzeugt sie in Gemeinschaft mit der unerwärmten Gabel lange, laute Schwebungen[1]). Lässt

[1]) Bei seinen wundervollen Versuchen über das Stimmen fand Scheibler in den Schwebungen einen Prüfstein für ausserordentlich zarte Temperaturunterschiede.

man die eine Gabel auf ihrem Resonanzboden tönen, während man die andere erregt und der Mündung des Resonanzbodens nähert, wie in Fig. 175 (a. v. S.), so verkünden laute Schwebungen, dass kein Einklang vorhanden ist. Ich theile ein Gefäss durch eine senkrechte Scheidewand in zwei Hälften und bringe eine Gabel über die eine Hälfte, die zweite Gabel über die zweite Hälfte des Gefässes. Die beiden Halbcylinder von Luft bringen durch ihre Interferenz Schwebungen hervor. Aber die Scheidewand ist überflüssig; wenn man sie entfernt, bleiben die Schwebungen nach wie vor bestehen, weil die eine Hälfte derselben Luftsäule mit der anderen interferirt[1]).

Die intermittirenden Klänge mancher Glocken, welche man dann am deutlichsten hört, wenn ihre Töne schwächer werden, sind eine Wirkung der Interferenz. In Folge mangelhafter Symmetrie schwingt die Glocke in einer Richtung etwas schneller als in der anderen, wie wir bereits in der vierten Vorlesung aus einander setzten, und das Zusammentreffen dieser zwei verschiedenen Schwingungsperioden erzeugt Schwebungen.

§. 8. Duane's schallfreie Zonen.

Es gereicht mir zu besonderem Vergnügen, an dieser Stelle über einige Beobachtungen des Generals Duane zu berichten, die dieser über Nebelsignale an der Küste von Maine in den Vereinigten Staaten angestellt hat. „Es giebt", schreibt er, „an dieser Küste sechs Dampfpfeifen. Diese werden oft auf eine Entfernung von 33 km gehört;

[1]) Mr. Wheatstone und Sir John Herschel haben, so viel ich weiss, diesen Versuch unabhängig von einander ausgeführt.

ebenso oft hört man sie auf eine Entfernung von 3 km nicht, ohne dass ein merklicher Unterschied in dem Zustande der Atmosphäre wahrzunehmen wäre." Diese Thatsache stimmt vollkommen überein mit den Beobachtungen am South Foreland bei Dover.

„Das Signal", fährt Duane fort, „wird oft in der einen Richtung sehr weit gehört, während es in der anderen auf ganz kurze Entfernungen kaum vernehmbar ist. Dem Winde ist dies nicht zuzuschreiben, da man das Signal oft gegen den Wind viel weiter hört, als mit dem Winde. So hört man z. B. die Pfeife auf Cap Elisabeth stets sehr deutlich in Portland, auf eine Entfernung von 3,2 km, wenn ein starker nordöstlicher Schneesturm direct aus Portland auf die Pfeife zusteht."

Auch das stimmt genau mit den Beobachtungen am South Foreland.

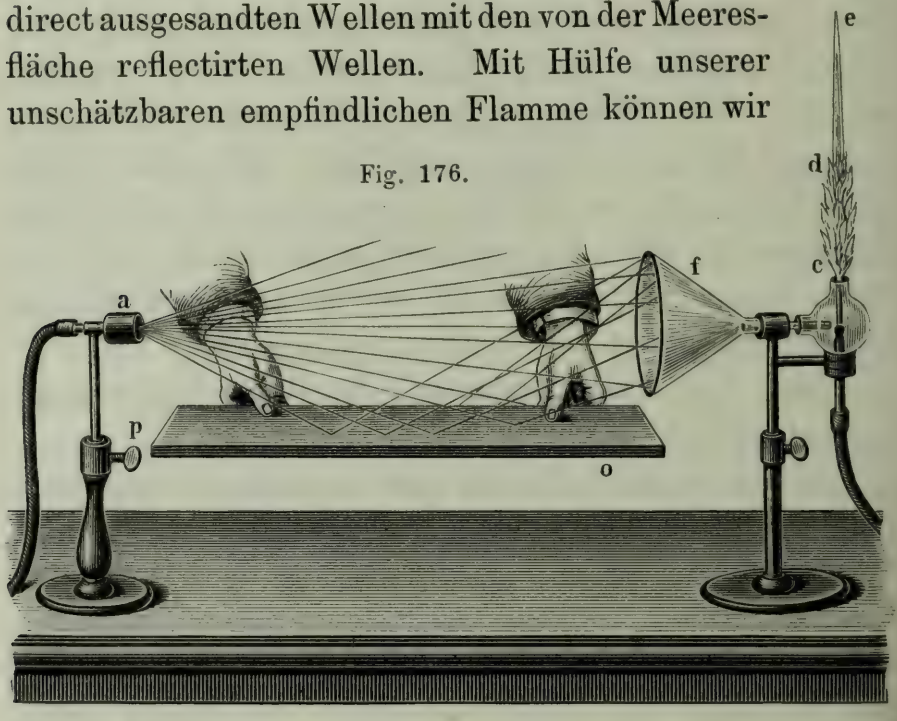
Sodann erwähnt Duane eine besonders interessante und bedeutsame Thatsache. „Die verwirrendsten Schwierigkeiten", schreibt er, „entstehen aus dem Umstande, dass das Signal oft wie von einem Gürtel umgeben scheint, dessen Radius zwischen $1^1/_2$ bis 2 km schwankt und in dem der Schall scheinbar vollständig fehlt. Wenn man sich von einer Station fortbewegt, ist der Ton innerhalb 14 km vernehmbar, bleibt dann auf dieselbe Entfernung aus und wird danach wieder auf lange Zeit gehört. Diese Erscheinung ist sämmtlichen Hörsignalen eigen und ist auf allen Stationen beobachtet worden, von denen die eine 33 km vom Festlande entfernt auf einem kahlen Felsen liegt und von keinen Gegenständen umgeben ist, die den Schall afficiren könnten."

Der General Duane ist meines Wissens der einzige, der diese merkwürdige Erscheinung beobachtet hat,

und die Gründlichkeit, mit der er ihr nachgeht, verräth einen klugen und scharfsinnigen Beobachter. Er giebt keine Erklärung der Thatsache; wir aber sind jetzt in der Lage, sie zu liefern.

Nach meiner Ueberzeugung entstehen diese schallfreien Zonen durch Interferenz der vom Nebelsignal direct ausgesandten Wellen mit den von der Meeresfläche reflectirten Wellen. Mit Hülfe unserer unschätzbaren empfindlichen Flamme können wir

Fig. 176.

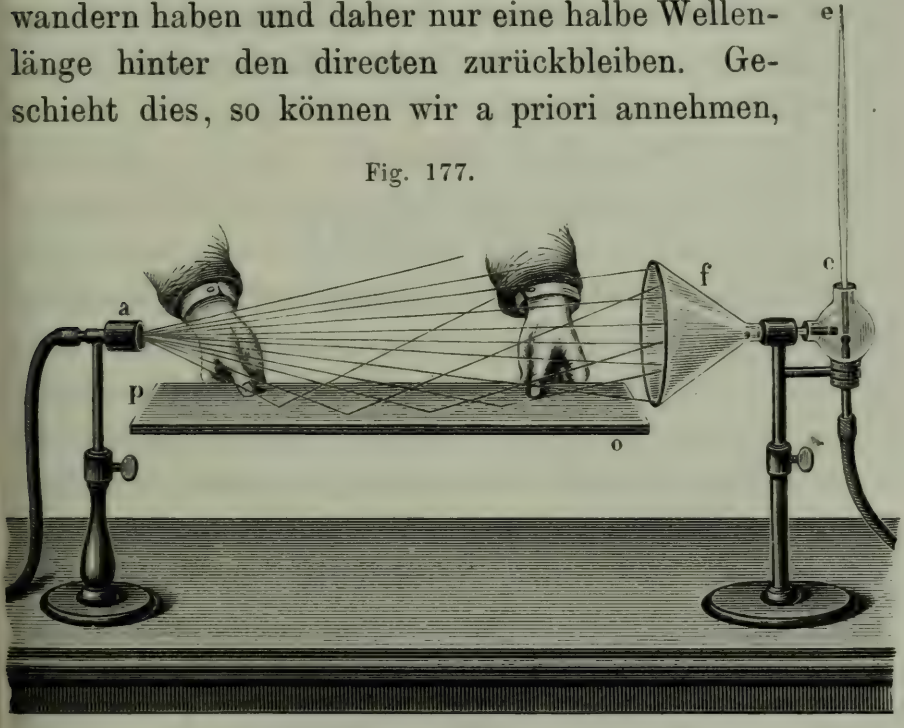


diese Theorie prüfen. Beobachten Sie zuerst, wie die Wirkung auf die Flamme durch Reflexion gesteigert wird. Die tönende Zunge befindet sich bei *a* (Fig. 176), die Flamme bei *c* und der Druck wird so regulirt, dass die Flamme zwar noch ruhig brennt, aber dem Flackern nahe ist. Zwischen *a* und *c* wird nun ein glattes, hölzernes Brett *po* eingeführt. Sobald sich die von dem Brette reflectirten Wellen den directen Wellen zugesellen, geräth die Flamme in heftige Bewegung. (In der Figur ist die ruhige Flamme in Verbindung mit der bewegten dargestellt.) Wird das Brett entfernt, so

beruhigt sich die Flamme, wird es wieder eingeführt, so flackert sie. Wirft man ein grobes wollenes Tuch über das Brett, während die Flamme erregt ist, so wird die Reflexion so abgeschwächt, dass die Flamme sich beruhigt. Entfernt man das Tuch, so flackert sie wieder.

Hier verstärken sich die directen und reflectirten Wellen gegenseitig. Es liegt jedoch auf der Hand, dass sich das Brett auch in einer Lage befinden kann, bei der die reflectirten Wellen eine grössere Entfernung zu durchwandern haben und daher nur eine halbe Wellenlänge hinter den directen zurückbleiben. Geschieht dies, so können wir a priori annehmen,

Fig. 177.



dass sich die directen und reflectirten Wellen gegenseitig vernichten werden. Zunächst muss der Druck so regulirt werden, dass die Flamme flackert, wenn die Zunge *a* (Fig. 177) ertönt. Sodann bringt man das glatte Brett vorsichtig zwischen die Zunge und die Flamme; bei einer bestimmten Höhe bewegt sich die Flamme heftiger. Hebt man das Brett noch höher, so wird die Flamme *ce* vollständig ruhig. Wenn wir also die

reflectirten Wellen mit einer passenden Verzögerung den directen Wellen zugesellen, so vernichten wir den Schall. Statt der Zunge wollen wir uns nun das Nebelsignal an der Küste von Maine denken, statt der Flamme einen Beobachter auf dem Deck eines Schiffes, und statt unseres Brettes das glatte Meer. In einer Entfernung von der Küste, bei der die reflectirten Wellen eine halbe Wellenlänge hinter den directen zurückbleiben, hätten wir dann genau dieselben Bedingungen, wie bei dem soeben ausgeführten Versuch; die Vereinigung der directen und reflectirten Wellen würde also die schallfreie Zone von Duane hervorbringen.

Combinationstöne.

Wir müssen jetzt von der Frage der Interferenz zur Betrachtung einer neuen Gattung musikalischer Klänge übergehen, als deren Urheber man lange Zeit die Schwebungen ansah. Die hier erwähnten Töne bedürfen zu ihrem Entstehen einer Verbindung von zwei verschiedenen musikalischen Tönen. Wo unter den richtigen Bedingungen eine solche Vereinigung stattfindet, entstehen Combinationstöne, welche ganz verschieden sind von den sie erzeugenden ursprünglichen Tönen. Diese Combinationstöne wurden im Jahre 1745 von einem deutschen Organisten Namens Sorge entdeckt, allein die Veröffentlichung seiner Entdeckung erregte nur wenig Aufmerksamkeit. 1754 wurden sie, davon unabhängig, von dem berühmten italienischen Violinspieler Tartini beobachtet und nach ihm Tartini'sche Töne genannt.

Um solche Töne zu erzeugen, ist es wünschenswerth, wenn auch nicht nothwendig, dass die beiden ursprüng-

lichen Töne möglichst intensiv seien. Helmholtz hält die Sirene für vorzugsweise geeignet, um sie hervorzubringen. In der That sind sie mit diesem Instrumente sehr leicht zu erzeugen. Es bedarf zuerst einiger Aufmerksamkeit seitens des Zuhörers, um den Combinationston von der übrigen Klangmasse abzusondern; allein mit einiger Uebung kommt man leicht dahin, und obwohl es dem ungeübten Ohre zuerst nicht gelingen mag, den Ton auf diese Weise zu zerlegen, wird doch die Klangfarbe in ganz unverkennbarer Weise durch das Hinzukommen der Combinationstöne beeinflusst. Ich versetze eine Dove'sche Sirene in Rotation und öffne gleichzeitig zwei Reihen von Löchern. Trotz gespannter Aufmerksamkeit bin ich ausser Stande, auch nur eine Spur von einem Combinationston zu vernehmen. Wenn ich das Instrument stärker antreibe, höre ich ein leises, dumpfes Dröhnen, das sich mit den zwei ursprünglichen Tönen vermischt. Treibe ich die Sirene immer schneller an, so steigt der tiefe Combinationston rasch in die Höhe und ist jetzt für mich, der ich ganz in der Nähe des Instrumentes stehe, deutlich hörbar. Die zwei geöffneten Löcherreihen zählen 8 und 12 Löcher. Der Combinationston ist in diesem Falle eine Octave tiefer, als der tiefere der beiden ursprünglichen Töne. Ich öffne jetzt zwei andere Löcherreihen mit 12 und 16 Löchern. Hier ist der Combinationston ganz deutlich hörbar und seine Schwingungszahl beträgt ein Drittel der Schwingungszahl des tieferen ursprünglichen Tones. Der Combinationston entspricht immer einer Schwingungszahl, welche gleich ist der Differenz der Schwingungszahlen der primären Töne.

Der Combinationston, um den es sich hier handelt, ist der bei diesem Versuche wirklich gehörte Ton.

Durch feinere Untersuchungsmethoden kann man aber das Dasein noch anderer Combinationstöne beweisen. Diejenigen, welchen wir unsere Aufmerksamkeit geschenkt haben, sind jedoch die wichtigsten. Helmholtz hat sie Differenztöne genannt wegen des oben angeführten Gesetzes.

Um diese Combinationstöne hörbar zu machen, müssen, wie gesagt, die ursprünglichen Töne möglichst stark sein. Sind letztere schwach, so bleiben die Combinationstöne unhörbar. Ich kenne keine Methode, wodurch diese Töne auf einfachere und deutlichere Weise hervorgebracht werden könnten, als vermittelst passender singender Flammen. Zwei solche Flammen können mächtige Töne hervorbringen, die, selbsterzeugt und selbsterhalten, keinerlei Muskelkraft seitens des Beobachters bedürfen, um sie in Gang zu halten. Sie sehen zwei davon vor sich. Die Röhren, die sie umgeben, sind je 264 und 290 mm lang. Ich lausche dem Klang und unterscheide inmitten des schrillen Tones einen sehr tiefen Combinationston. Er ist tief, weil die beiden Röhren fast gleich lang sind. Daher ist die Differenz zwischen ihren Schwingungen sehr gering, und der Ton, der dieser Differenz entspricht, ist tief. Verlängere ich eine der Röhren mittelst eines Schiebers, so steigt der Combinationston allmälig und schwillt schliesslich zu überraschender Stärke an. Verkürze ich die Röhre, so sinkt der Combinationston wieder. Wenn ich auf diese Weise den Schieber bald hebe, bald senke, so steigt und fällt der Combinationston, dem Gesetze gemäss, dass die Zahl seiner Schwingungen der Differenz zwischen den Schwingungszahlen der ursprünglichen Töne gleichkommt.

Wir können mit leichter Mühe die wirkliche Schwingungszahl bestimmen, welche irgend einem dieser Com-

binationstöne entspricht. Der Klang der Flamme ist der der offenen Röhre, welche sie umgiebt, und wir wissen aus der dritten Vorlesung, dass eine solche Röhre halb so lang ist, als die durch sie hervorgebrachte Tonwelle. Die Wellenlänge, welche unserer 264 mm langen Röhre entspricht, beträgt 528 mm. Die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft von der Temperatur dieses Zimmers ist 342 m in der Secunde. Verwandeln wir diese Meter in Millimeter und theilen wir sie mit 528, so finden wir, dass die Zahl der Schwingungen, welche der Länge von 264 mm entspricht, 648 in der Secunde beträgt.

Allein man darf nicht vergessen, dass die Luft, in der die Schwingungen thatsächlich ausgeführt werden, viel elastischer ist als die Luft in diesem Zimmer. Die Flamme erhitzt die Luft innerhalb der Röhre, und die Schwingungen müssen deshalb rascher erfolgen, als dies in einer gewöhnlichen Orgelpfeife von derselben Länge der Fall sein würde. Um die Anzahl der Schwingungen genau zu bestimmen, müssen wir die Sirene zu Hülfe nehmen. Bei diesem Instrument zeigt sich, dass die Luft innerhalb unserer 264 mm langen Röhre 717 Schwingungen in der Secunde ausführt. Die Differenz von 69 Schwingungen in der Secunde ist der Erwärmung der Luftsäule zuzuschreiben. Hierzu kommt noch, dass das Vorhandensein von Kohlensäure und Wasserdämpfen, den Verbrennungsproducten der Flamme, auf die Geschwindigkeit der Schwingungen einwirkt.

Wenn wir auf dieselbe Weise die Schwingungszahl unserer 290 mm langen Röhre bestimmen, so finden wir, dass sie 667 in der Secunde beträgt; die Differenz zwischen dieser Zahl und 717 ist 50, und dies ist die

Schwingungszahl, welche unserem ersten tiefen Combinationston entspricht.

Allein diese Zahl bezeichnet noch nicht die Grenze der Hörbarkeit. Ich lasse die 290 mm lange Röhre unverändert und verlängere die andere, bis der Combinationston nahe an die Grenzen meines Hörvermögens streift. Wenn meine kürzere Röhre 270 mm misst, kann ich noch immer den tiefen Combinationston deutlich hören. Die Zahl der Schwingungen, welche in dieser 270 mm langen Röhre stattfinden, ist 700. Wir haben bereits die Zahl der in der 290 mm langen Röhre stattfindenden Schwingungen auf 667 festgesetzt.

$$700 - 667 = 33.$$

Dies ist also die entsprechende Schwingungszahl für den Combinationston, den ich bei gespannter Aufmerksamkeit noch deutlich hören kann. Wir sind jetzt nahe an der Grenze angelangt, welche Helmholtz für die Vernehmbarkeit musikalischer Töne festsetzte. Vereinigt man den Ton einer 441 mm langen Röhre mit dem der 264 mm langen Röhre, so entsteht dadurch ein Combinationston, der viel höher ist als alle früheren. Die genaue Zahl der in der längeren Röhre stattfindenden Schwingungen ist 459; die der 264 mm langen Röhre ist, wie wir bereits wissen, 717.

$$717 - 459 = 258.$$

Dies ist also die Zahl, welche dem jetzt hörbaren Combinationston entspricht. Dieser Ton ist beinahe genau derjenige einer unserer Stimmgabeln, welche 256 Mal in der Secunde schwingt.

Und nun lassen Sie uns einen Augenblick Halt machen, wozu dieses Resultat uns einladet. Die wohl-

bekannte Gabel, die mit der eben angegebenen Geschwindigkeit vibrirt, ist an ihrem Resonanzkasten befestigt. Ich berühre sie mit meinem Bogen so leise, dass dieser Ton allein kaum gehört werden kann; aber derselbe vereinigt sich alsbald mit dem Combinationstone und die durch ihre Verbindung erzeugten Schwebungen sind deutlich hörbar. Wenn ich meine Stimmgabel belaste und so ihre Tonhöhe verändere, oder wenn ich meinen Papierschieber aufziehe und so die Tonhöhe der Flamme verändere, kann ich die Geschwindigkeit dieser Schwebungen verändern, gerade wie wenn ich zwei einfache Töne mit einander vergleiche. Eine leise Veränderung in der Flammenstärke bringt dieselbe Wirkung hervor. Sie werden gewiss bemerken, wie schön diese Resultate übereinstimmen.

Wenn ich in der Mitte zwischen der Sirene und einer schrill tönenden Flamme stehe und die Tonhöhe der Sirene allmählich in die Höhe treibe, so wird der Combinationston bald hörbar und schwillt zuweilen zu ungewöhnlicher Stärke an. Wenn eine Stimmpfeife nahe an der Flamme angeblasen wird, lässt sich der Combinationston auch vernehmen, und scheint uns in diesem Falle im Ohre oder wohl gar im Gehirn zu entstehen. Beim allmählichen Ausziehen des Pfeifenstempels verändert sich die Tonhöhe dem bereits besprochenen Gesetze gemäss.

Die Combinationstöne, welche bei der Verbindung der gewöhnlichen harmonischen Intervalle[1]) entstehen, sind in der nachfolgenden Tabelle enthalten:

---

[1]) Ein Gegenstand, den wir in unserer nächsten Vorlesung behandeln werden.

Intervalle	Verhältniss der Schwingungszahlen	Differenz	Der Combinationston ist tiefer als der tiefste primäre Ton um
Octave	1 : 2	1	0
Quinte	2 : 3	1	1 Octave
Quarte	3 : 4	1	1 Duodecime
Grosse Terz . .	4 : 5	1	2 Octaven
Kleine Terz . .	5 : 6	1	2 Octaven und 1 grosse Terz
Grosse Sexte . .	3 : 5	2	1 Quinte
Kleine Sexte . .	5 : 8	3	Grosse Sexte

Der berühmte Thomas Young schrieb diese Combinationstöne der Zusammenwirkung rascher Schwebungen zu, welche sich wie die periodischen Impulse gewöhnlicher musikalischer Töne an einander ketten. Diese Erklärung stimmte mit der Thatsache überein, dass die Zahl der Schwebungen, wie die der Schwingungen des Combinationstones, gleich der Differenz ist zwischen den zwei Schwingungssystemen, welche die Schwebungen verursachen. Diese Erklärung ist jedoch ungenügend. Die Schwebungen fallen mehr ins Gehör, als irgend ein dauernder Ton. Man kann sie noch deutlich hören, nachdem jeder der beiden Töne, wodurch sie hervorgerufen werden, bereits unhörbar geworden ist. Dies beruht theils auf unserem Gehörsinne, theils auf der Thatsache, dass, wenn zwei gleich starke Töne Schwebungen hervorrufen, die Schwingungsweite der Lufttheilchen bald vernichtet, bald verdoppelt wird. Durch Verdoppelung der Schwingungsweite vervierfachen wir aber die Tonstärke. Deshalb, wenn zwei gleich starke Töne Schwebungen hervorbringen, so wechselt der Ton unaufhörlich zwischen Stille und einem

Klang, der vier Mal so stark ist, als jeder der beiden interferirenden Töne.

Wenn also die Combinationstöne den Schwebungen ihrer beiden ursprünglichen Töne zuzuschreiben wären, so müssten sie auch dann gehört werden, wenn letztere schwach sind. Allein sie werden unter solchen Umständen nicht gehört. Wenn verschiedene Töne dieselbe Luftmasse durchwandern, so geht jeder einzelne dieser Töne durch die Luft, als ob er allein vorhanden wäre und jeder einzelne Bestandtheil der Tonmischung behauptet seine eigene Individualität. Dies findet aber nur dann statt, wenn die Amplitude der schwingenden Theilchen unendlich klein ist. Der Mathematiker gelangt durch rein abstracte Schlüsse zu diesem Resultat. Das Gesetz ist auch in der Praxis richtig, wenn die Bewegungen ausserordentlich klein sind; allein es ist nicht richtig, wenn letztere eine gewisse Grenze überschritten haben. Schwingungen, welche eine ausgiebigere Bewegung verursachen, erzeugen noch secundäre Wellen, die an das Ohr als Combinationstöne anschlagen. Nachdem Helmholtz dieses bewiesen hatte, schloss er, dass nicht nur durch die Differenz zwischen den ursprünglichen Tönen, sondern auch durch die Summe derselben Combinationstöne entstehen. Er entdeckte so theoretisch seine Summationstöne, noch ehe er dieselben gehört hatte; und indem er dieses Resultat der Probe des Experimentes unterwarf, fand er, dass diese Summationstöne wirklich existiren. Dieselben werden nicht durch die Young'sche, wohl aber durch die Helmholtz'sche Theorie vollständig erklärt.

Eine andere Folge dieser Abweichung vom Gesetze der Superposition besteht darin, dass ein einzelner tönender Körper, welcher die Luft stärker erschüttert,

als es die Grenzen des Gesetzes von der Superposition der Schwingungen zulassen, auch secundäre Wellen erregt, welche den harmonischen Tönen des schwingenden Körpers entsprechen. So ist zum Beispiel die Schwingungszahl des ersten Obertones einer Stimmgabel, wie wir dies in unserer vierten Vorlesung erörtert haben, $6^1/_4$ Mal grösser als die des Grundtones. Allein Helmholtz zeigte, dass eine Stimmgabel, welche nicht mittelst eines Bogens, sondern durch kräftiges Anschlagen an einen Klotz zum Tönen gebracht wird, deutlich die Octave ihres Grundtones giebt, welche Octave den secundären Wellen zuzuschreiben ist, die beim Ueberschreiten des Gesetzes von der Superposition entstehen.

Aus diesen Betrachtungen werden Sie ersehen, dass eine Verbindung von musikalischen Tönen ein viel verwickelterer dynamischer Zustand ist, als Sie bisher angenommen haben. Bei einer Orchestermusik haben wir nicht nur die Grundtöne jeder Saite und jedes Blasinstrumentes, sondern wir haben auch die Obertöne von jedem, welche zuweilen bis zum Sechszehnten der betreffenden Reihe zu hören sind. Ausserdem haben wir noch Combinationstöne, sowohl Summationstöne als Differenztöne; alle schwirren durch dieselbe Luftmasse, und alle prallen an dasselbe Trommelfell an. Wir haben interferirende Grundtöne, interferirende Obertöne und interferirende Combinationstöne. Und ausserdem interferiren die Glieder jeder einzelnen Gattung mit den Gliedern jeder anderen Gattung. Die Phantasie verzichtet auf den Versuch, sich den physikalischen Zustand der Atmosphäre, durch welche alle diese Töne hindurchgehen, vorzustellen. Und wie wir in unserem nächsten Vortrage sehen werden, ging das Ziel der Musik durch alle Jahrhunderte, während welcher sie zur

Freude der Menschheit gedient hat, dahin, die Dinge auf empirischem Wege so zu ordnen, dass das Ohr nicht von den Misstönen, welche diese mannigfaltigen Interferenzen hervorrufen, zu leiden habe. Die Musiker wussten nichts von den physikalischen Thatsachen und Principien, welche ihren Bemühungen zu Grunde lagen; sie wussten davon nicht mehr, als die Erfinder des Schiesspulvers von dem Gesetze der Atomgewichte. Sie gaben sich nicht eher zufrieden, bis sie zum Ziele kamen, und erst jetzt, seitdem die Wissenschaft sich dieser Materie bemächtigt hat, steigt Ordnung aus dem Chaos empor, und es zeigt sich, dass die Resultate des Empirismus mit den Naturgesetzen zusammenstimmen.

Uebersicht der achten Vorlesung.

Wenn mehrere Wellensysteme, welche von verschiedenen Erregungsmittelpunkten ausgehen, sich in Wasser oder Luft verbreiten, so ist die Bewegung jedes Theilchens die algebraische Summe der verschiedenen Bewegungen, welche ihm mitgetheilt werden.

Wenn bei Wasser die Wellenberge eines Systemes mit denjenigen eines anderen Systemes coincidiren, so werden als Ergebniss dieses Zusammentreffens höhere Wellen entstehen. Allein, wenn die Wellenberge eines Systemes mit den Wellenfurchen des anderen Systemes coincidiren, so vernichten sich die beiden Systeme gegenseitig, entweder theilweise oder ganz.

Diese gegenseitige Vernichtung der beiden Wellensysteme wird Interferenz genannt.

Dieselben Bemerkungen sind auf die Tonwellen anzuwenden. Wenn bei zwei Tonwellen-Systemen Verdichtung mit Verdichtung und Verdünnung mit Verdünnung zusammentrifft, so ist der durch diese Coincidenz erzeugte Ton lauter, als ein Ton, der durch ein einzelnes System hervorgebracht wird. Allein, wenn die Verdichtungen des einen Systemes mit den Verdünnungen des anderen coincidiren, so wird eine theilweise oder totale Vernichtung beider Systeme die Folge sein.

Bringt man zwei Orgelpfeifen von derselben Tonhöhe auf denselben Blasebalg und versetzt man sie in Schwingung, so beeinflussen sie sich in der Weise, dass, während die Luft aus der Mündung der einen Röhre austritt, sie in die der

anderen Röhre eindringt. In dem Augenblicke, wo die eine eine Verdichtung erzeugt, bringt also die andere eine Verdünnung hervor. Die Töne zweier solcher Pfeifen heben sich gegenseitig auf.

Wenn zwei musikalische Klänge von nahezu gleicher Tonhöhe zu gleicher Zeit ertönen, so wird der Fluss des Tones durch Schwebungen oder Schläge gestört.

Diese Schwebungen sind der abwechselnden Coincidenz und Interferenz der zwei Tonwellensysteme zuzuschreiben. Wenn beide Töne von gleicher Stärke sind, bringt ihre Coincidenz einen vier Mal so starken Ton hervor, während ihre Interferenz absolute Stille erzeugt.

Die Wirkung zweier auf diese Weise vereinigter Töne ist eine Reihe von Schlägen, welche wir „Schwebungen“ genannt haben, und die durch „Pausen“ von einander getrennt sind.

Die Anzahl der Schwebungen in der Secunde ist gleich der Differenz der beiden Schwingungszahlen.

Beim Tönen einer Glocke oder einer Scheibe neutralisiren sich theilweise die Schwingungen, welche auf den entgegengesetzten Seiten derselben Knotenlinie stattfinden; bei einer Stimmgabel neutralisiren sich theilweise die Schwingungen ihrer beiden Zinken. Durch Abschneiden eines Theiles der Schwingungen kann in solchen Fällen der Ton verstärkt werden.

Wenn ein Lichtstrahl von den Zinken zweier Stimmgabeln, welche Schwebungen geben, zurückgeworfen wird und auf einen Schirm fällt, so wird die Intermittenz des Tones durch die abwechselnde Verlängerung und Verkürzung des Lichtstreifens auf dem Schirme sichtbar.

Die schallfreien Zonen, wie sie der General Duane an der nordamerikanischen Küste beobachtete, sind dem Umstande zuzuschreiben, dass die directen Tonwellen und die von der Meeresoberfläche reflectirten Wellen sich durch Interferenz gegenseitig vernichten.

Das eben angeführte Gesetz von der Superposition der Schwingungen trifft nur dann genau zu, wenn die Schwin-

gungsweite sehr gering ist. Wenn die Luft durch einen tönenden Körper so heftig erregt wird, dass das Gesetz nicht mehr anwendbar ist, entstehen secundäre Wellen, welche den harmonischen Tönen des tönenden Körpers entsprechen.

Wenn zwei Töne so intensiv sind, dass sie die Grenzen der ungestörten Superposition überschreiten, so verbinden sich ihre secundären Wellen, um Combinationstöne zu bilden.

Es giebt zwei Arten von Combinationstönen; die Schwingungszahl der einen ist gleich der Differenz der Schwingungszahl der primären Töne, während die Schwingungszahl der anderen deren Summe entspricht. Die ersteren werden Differenztöne, die letzteren Summationstöne genannt.

Neunte Vorlesung.

Verbindung musikalischer Töne. — Je kleiner die Zahlen sind, welche das Schwingungsverhältniss zwischen zwei Tönen ausdrücken, desto vollkommener ist die Harmonie. — Begriffe der Pythagoräer über musikalische Consonanz. — Theorie der Consonanz von Euler. — Theorie von Helmholtz. — Die Dissonanz rührt von den Schwebungen oder Schlägen her. — Interferenz der Grundtöne und der Obertöne. — Mechanismus des Gehörs. — Max Schultze's Hörhärchen. — Die Hörsteinchen. — Corti'sche Fasern. — Graphische Darstellung der Consonanz und Dissonanz. — Musikalische Saiten. — Töne der diatonischen Scala. — Die Schwingungen der musikalischen Intervalle werden sichtbar gemacht. — Lissajous' Figuren. — Das Mitschwingen. — Verschiedene Methoden, die zusammengesetzten Schwingungen zu erläutern.

---

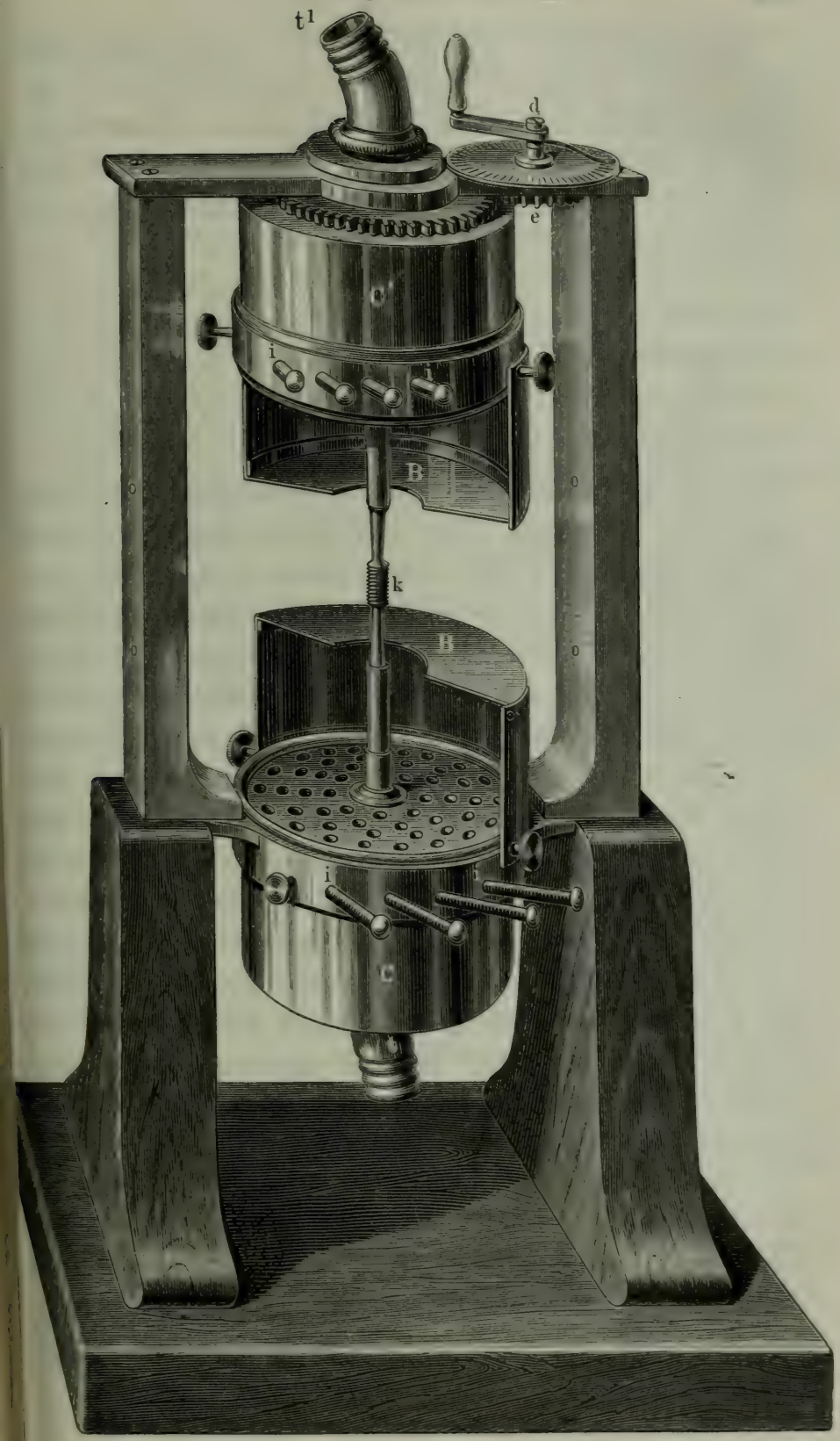
§. 1. Musikalische Consonanz.

Der Gegenstand unseres heutigen Vortrages umfasst zwei Gebiete: ein physikalisches und ein psychisches, deren Verwandtschaft wir zu bestimmen haben werden. Wir haben musikalische Töne, welche in bestimmter gegenseitiger Verbindung stehen, zu untersuchen, und den Grund darzulegen, warum manche Verbindungen dem Ohre angenehm, andere ihm unangenehm sind.

Pythagoras that den ersten Schritt zur physikalischen Erklärung der musikalischen Intervalle. Er spannte eine Saite auf und theilte sie alsdann in drei gleiche Theile. An einem der Theilungspunkte befestigte

er sie und theilte sie auf diese Weise in zwei Theile, wovon der eine doppelt so lang war als der andere. Er liess beide gleichzeitig ertönen und fand, dass der Ton des kürzeren Endes eine Octave höher war als der des längeren Endes. Hierauf theilte er seine Saite in zwei Theile, welche im Verhältniss von 2 : 3 zu einander standen, und fand, dass das Intervall zwischen den Tönen eine Quinte betrug. So fand Pythagoras, indem er seine Saite an verschiedenen Punkten abtheilte, dass die sogenannten consonanten Intervalle der Musik gewissen Längenverhältnissen einer Saite entsprechen; und er machte die sehr wichtige Entdeckung, dass die beiden Töne um so vollkommener harmoniren, je einfacher das Verhältniss zwischen beiden Theilen einer Saite ist. Hier blieb Pythagoras stehen. Erst spätere Forscher zeigten, dass dieses Verhalten der Saiten eine Folge des Verhältnisses ihrer Länge zu der Zahl ihrer Schwingungen ist. Warum die Einfachheit Befriedigung gewähre, blieb lange ein Räthsel. Euler war der einzige, der es zu lösen versuchte, indem er behauptete, dass die menschliche Seele an einfachen Zahlenverhältnissen ein natürliches Wohlgefallen finde.

Mittelst der Doppelsirene auf Fig. 178 können wir mannigfache Tonverbindungen erhalten. Dieses Instrument besitzt vor allen anderen den Vorzug, dass wir augenblicklich das Schwingungsverhältniss von jeden beliebigen zwei Tönen bestimmen können, wenn wir einfach die ihnen entsprechende Anzahl der Löcher zählen. Ehe wir zu diesen Combinationen schreiten, will ich Ihnen die Wirkung der Doppelsirene etwas genauer erklären, als es bisher für unsere Zwecke nöthig war.


t1
d
e
i
i
B
k
B
i
C

Das Instrument besteht, wie Sie wissen, aus zwei Dove'schen Sirenen C' und C, welche durch eine gemeinschaftliche Axe verbunden sind, jedoch in der Weise, dass die obere Sirene C' umgekehrt aufgesetzt ist. Jede Sirene ist mit vier Reihen von Oeffnungen versehen, die in folgender Weise numerirt sind:

	Obere Sirene Zahl der Oeffnungen	Untere Sirene Zahl der Oeffnungen
Erste Reihe	16	18
Zweite Reihe	15	12
Dritte Reihe	12	10
Vierte Reihe	9	8

Die Zahl 12 ist beiden Sirenen gemeinschaftlich. Ich öffne jetzt die Reihe Zwölf bei beiden und treibe Luft in das Instrument ein; beide Töne fliessen in vollkommenstem Einklange ab, und der Einklang bleibt derselbe, auch wenn ich den Ton in die Höhe treibe. Wir können aber, wie Sie aus unserer zweiten Vorlesung wissen, durch Umdrehung der Kurbel an der oberen Sirene bewirken, dass die Oeffnungen ihres Windkastens C' entweder denen der rotirenden Scheibe sich entgegen bewegen oder aber vor ihnen zurückweichen, wodurch die Tonhöhe der oberen Sirene entweder gesteigert oder verringert wird. Diese Veränderung der Tonhöhe kündigt sich augenblicklich durch Schwebungen an. Je schneller die Kurbel gedreht wird, desto mehr wird der Ton der oberen Sirene sich über den der unteren erheben oder unter denselben herabsinken, und desto schneller werden also die Schwebungen erfolgen.

Die Drehung der Kurbel steht zu der Drehung des Windkastens in folgendem Verhältniss: wenn die Kurbel eine Drehung von einem halben rechten Winkel macht, so dreht sich der Windkasten durch $^1/_6$ eines rechten Winkels oder durch $^1/_{24}$ seines ganzen Umkreises.

Allein in dem jetzt vorliegenden Falle, wo der Kreis durch 12 Oeffnungen unterbrochen ist, bewirkt die Drehung durch $^1/_{24}$ des Umkreises, dass die Löcher der oberen Sirene genau in denselben Momenten geschlossen sind, in denen die der unteren Sirene geöffnet werden, und umgekehrt. Es ist deshalb klar, dass die Pausen zwischen den Luftstössen der unteren Sirene, welche mit den Verdünnungen ihrer Tonwellen zusammenfallen, durch die Luftstösse oder Verdichtungen der oberen Sirene ausgefüllt sind. In der That fallen die Verdichtungen der einen mit den Verdünnungen der anderen zusammen, und die Töne beider Sirenen werden daher vollständig vernichtet.

Meine Behauptung erscheint Ihnen vielleicht übertrieben, denn Sie hören noch immer einen Ton, auch wenn die Kurbel so steht, dass absolute Stille eintreten müsste. Wird die Kurbel beständig gedreht, so tritt zwar ein abwechselndes An- und Abschwellen des Tones ein, aber der Ton verschwindet niemals vollständig. Dies rührt daher, dass der Ton der Sirene ein sehr zusammengesetzter ist. Durch die Heftigkeit und Plötzlichkeit ihrer Stösse erzeugt sie nicht bloss solche Wellen, die der Zahl ihrer Oeffnungen entsprechen, sondern die aufgestörte Luft geräth auch noch in secundäre Wellen, welche sich mit den ursprünglichen Wellen des Instrumentes genau in derselben Weise vereinigen, wie die harmonischen Obertöne einer Saite oder einer offenen Orgelpfeife sich mit dem Grundton vermischen. Die Sirene giebt also beim Anblasen ausser dem Grundton noch dessen Octave, Duodecime, Doppeloctave u. s. w. an. Das heisst, sie bringt die Luft in Schwingungen, welche die zwei-, drei- und vierfache Geschwindigkeit der Grundschwingung haben. Wenn wir nun die obere

Sirene durch $^1/_{24}$ ihres Umkreises drehen, vernichten wir zwar den Grundton vollkommen, allein wir vernichten nicht seine Octave [1]). Wenn ich also die Kurbel so einstelle, dass der Grundton vernichtet wird, tritt nicht Stille, sondern der volle erste harmonische Oberton des Instrumentes ein.

Helmholtz umgiebt sowohl seine obere als seine untere Sirene mit runden Messingkapseln, *BB*, deren jede aus zwei Hälften besteht, die leicht aus einander zu nehmen sind. Auf der Abbildung ist die Hälfte jeder Kapsel weggelassen. Diese Kapseln verstärken durch ihre Resonanz den Grundton des Instrumentes und machen es uns möglich, seinen Veränderungen viel leichter zu folgen. Es bedarf einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit, um die stärkste Resonanz der Messingkapseln hervorzurufen; allein sobald diese Geschwindigkeit erreicht ist, schwillt der Grundton gewaltig an, und wenn alsdann die Kurbel gedreht wird, erfolgen die Schwebungen mit ungewöhnlicher Kraft.

Doch sind, wie gesagt, die Pausen zwischen den Schwebungen des Grundtones nicht Intervalle von absoluter Stille, sondern sie sind durch die höhere Octave ausgefüllt, und deshalb ist grosse Vorsicht nöthig, wenn man das Instrument dazu benutzen will, um Schwingungszahlen zu bestimmen. Ich hebe dies nicht ohne Grund hervor. Als ich einst wünschte, die Schwingungszahl einer kleinen singenden Flamme zu bestimmen, setzte ich eine Sirene in eine gewisse Entfernung von der Flamme, blies das Instrument an und sah nach einiger Zeit, wie die Flamme im Zusammenklange mit hörbaren Schwebungen tanzte. Ich nahm es als aus-

[1]) Ebensowenig einen der Töne, deren Schwingungszahlen grade Vielfache des Grundtones sind.

gemachte Sache an, dass der Einklang beinahe erreicht sei, und bestimmte unter dieser Voraussetzung die Schwingungszahl. Dieselbe war ausserordentlich niedrig, ja kaum halb so hoch, als sie sein musste. Woran lag dies? Einfach daran, dass ich es mit der Octave des Grundtones statt mit diesem selbst zu thun hatte. Durch das Zusammenwirken dieser Octave und der Flamme entstanden Schwebungen. Daher gab der Zähler des Instrumentes, der nicht die Schwingungszahl der Octave, sondern die des Grundtones anzeigt, nur die Hälfte der richtigen Zahl an. Ich brachte später den Grundton selbst mit der Flamme in Einklang. Als sie dem Einklang nahe waren, traten abermals Schwebungen auf, und die Flamme hüpfte nun viel energischer, als zuvor bei der Octave. Der Zähler des Instrumentes zeigte jetzt die richtige Schwingungszahl der Flamme.

Die ersten Töne, welche man bei der Sirene hört, sind stets Obertöne. Sie sind die ersten, die andauernd tönen und bereits als glatte musikalische Töne dahinfliessen, während der Grundton noch intermittirt. Der Apparat ist jedoch so fein gebaut, dass sehr schnell eine Rotationsgeschwindigkeit erreicht wird, die den Grundton über seine Begleiter erhebt; und wenn man diese Geschwindigkeit durch schwaches Antreiben des Blasebalges zu mässigen sucht, so geschieht dies auf Kosten der Intensität der Obertöne. Daher ist es zur Untersuchung der Obertöne wünschenswerth, ein Mittel zu finden, wodurch ein starker Luftstrom und langsame Rotation möglich wird.

Helmholtz liess eine Feder leicht gegen die Scheibe der Sirene drücken, und indem er die Rotationsgeschwindigkeit sehr langsam zunehmen liess, war er im Stande, das Uebergewicht der Obertöne im Anfang und

den schliesslichen Sieg des Grundtones zu beobachten. Er verliess sich nicht auf die directe Wahrnehmung der Tonhöhe, sondern bestimmte den Ton nach der Zahl der Schwebungen, die einer Umdrehung der Kurbel an der oberen Sirene entsprachen. Wenn 12 Löcher oben und 12 unten geöffnet sind und man die Kurbel durch 45° dreht, so tritt Intermittenz und Aufhören des Grundtones ein. Die Coincidenzen dieses Tones finden am Schlusse jeder Drehung von 90° statt. Deshalb müssen bei dem Grundton vier Schwebungen auf je eine ganze Umdrehung der Kurbel kommen. Nun fand aber Helmholtz, als er zuerst diese Einrichtung traf, dass von den im Anfange hörbaren Schwebungen nicht 4, sondern 12 auf jede Umdrehung kamen. Es waren dies in der That die Schwebungen des zweiten Obertones, dessen Schwingungszahl drei Mal grösser ist als die des Grundtones. Diese Schwebungen erfolgten so lange, als die Zahl der Luftstösse nicht über 30 oder 40 stieg. Zwischen 40 und 80 fiel die Zahl der Schwebungen von 12 auf 8 für je eine Drehung der Kurbel. Innerhalb dieses Intervalls war der erste Oberton oder die Octave des Grundtones am stärksten und seine Schwebungen am deutlichsten. Die Zahl der Schwebungen sank erst dann auf 4 für je eine Drehung, als die Luftstösse über 80 gestiegen waren; oder in anderen Worten, erst wenn die Rotationsgeschwindigkeit diese Grenze überschritten hatte, war der Grundton im Stande, sein Uebergewicht über seine Begleiter geltend zu machen.

Wir wollen nun unsere Töne in bestimmter Ordnung verbinden, und die musikalisch Geschulten unter meinen Zuhörern mögen die musikalische Verwandtschaft dieser Töne bestimmen. Sie haben bereits den Fluss des vollkommenen Einklanges gehört, wenn die zwei Reihen

von 12 Löchern geöffnet sind. Ich öffne jetzt eine Reihe von 8 Löchern in der oberen, und von 16 in der unteren Sirene. Sie werden dieses Intervall sofort als eine Octave erkennen. Oeffne ich eine Reihe von 9 Löchern in der oberen und von 18 in der unteren Sirene, so bleibt das Intervall noch immer eine Octave. Dies beweist, dass das Intervall nicht dadurch gestört wird, dass man die absoluten Schwingungszahlen verändert, so lange das Verhältniss der beiden Zahlen sich gleich bleibt. Diese Thatsache tritt noch schlagender hervor, wenn man mit ganz langsamer Drehung anfängt und die Sirene bis zur höchsten Tonhöhe antreibt; so lange die Löcher im Verhältniss von 1 : 2 bleiben, behalten wir beständig das Intervall einer Octave. Oeffne ich eine Reihe von 10 Löchern in der oberen und 15 in der unteren Sirene, so ist das Verhältniss wie 2 : 3, und jeder hier anwesende Musiker weiss, dass dies dem Intervall einer Quinte entspricht. Wenn ich ein System von 12 Löchern in der oberen und von 18 in der unteren Sirene öffne, so verändere ich dadurch das Intervall nicht. Durch das Oeffnen zweier Reihen von 9 und 12 oder von 12 und 16 Löchern ergiebt sich das Intervall einer Quarte, indem das Verhältniss in beiden Fällen wie von 3 : 4 ist. Ebenso ergeben zwei Serien von 8 und 10 oder von 12 und 15 Löchern das Intervall einer grossen Terz, indem das Verhältniss hier wie von 4 : 5 ist. Und öffne ich nun noch die Reihen von 10 und 12 oder von 15 und 18 Löchern, so bekommen wir das Intervall einer kleinen Terz, das dem Verhältniss von 5 : 6 entspricht.

Diese Versuche erläutern zweierlei Punkte: erstens, dass ein musikalisches Intervall nicht durch die absolute Schwingungszahl der beiden verbundenen Töne, sondern

durch das Verhältniss ihrer Schwingungen bestimmt wird. Zweitens, und dies ist von der grössten Bedeutung, dass, je kleiner die beiden Zahlen sind, welche das Schwingungsverhältniss der beiden Töne ausdrücken, desto vollkommener auch der Zusammenklang der beiden Töne ist. Die vollkommenste Consonanz ist der Einklang 1 : 1, hierauf folgt die Octave 1 : 2, hierauf die Quinte 2 : 3, dann die Quarte 3 : 4, dann die grosse Terz 4 : 5 und schliesslich die kleine Terz 5 : 6. Ich kann zwei Reihen von 8 und 9 Löchern öffnen. Dieses Intervall entspricht einem ganzen Tone in der Musik. Es ist dies eine Dissonanz. Zwei Reihen von 15 und 16 Löchern ergeben ein Intervall von einem halben Ton; dies ist eine scharfe, schneidende Dissonanz.

§. 2. Die Theorie der musikalischen Consonanz. Pythagoras und Euler.

Wie sollen wir uns diese Thatsache erklären? Warum muss die kleinere Zahl die vollkommenere Consonanz ausdrücken? Schon im Alterthum versuchte man diese Frage zu lösen. Die Pythagoräer fanden geistige Befriedigung in der Antwort: „Alles ist Zahl und Harmonie.“ Auch glaubten sie, das Zahlenverhältniss zwischen den sieben Tönen der musikalischen Scala drücke die Entfernungen der Planeten von ihrem centralen Feuer aus; daher sprachen sie von dem „Reigentanz der Weltkörper und der Musik der Sphären“, die angeblich nur Pythagoras zu hören vergönnt war. Können wir nicht im Vorübergehen diesen schönen Aberglauben mit den Dingen vergleichen, welche in unseren Tagen in der menschlichen Phantasie Raum gewonnen haben? Wäre der Charakter, den der Aberglaube zu verschiedenen Zeiten annimmt, ein Maassstab

für den Fortschritt oder Rückschritt der Menschheit, so hätte wahrlich das neunzehnte Jahrhundert wenig Ursache, sich zu brüsten im Vergleiche mit dem sechsten Jahrhundert v. Chr. Ernsthafter war dann der Versuch des berühmten Mathematikers Euler, den vollkommeneren Einklang der kleineren Zahlenverhältnisse auf methaphysischem Wege zu erklären, und diese Erklärung, wenn man sie so nennen will, brachte lange Zeit hindurch die Frager zum Schweigen, auch wenn sie ihnen vielleicht keine Befriedigung gewährte. Euler analysirt die Ursache des Wohlgefallens. Wir finden Gefallen an Ordnung, und es ist uns angenehm, „Mittel zu sehen, die zu einem Zwecke führen". Allein die Anstrengung, diese Ordnung zu entdecken, darf nicht so gross sein, dass sie uns ermüdet. Wenn die Verhältnisse, welche wir entwirren müssen, zu verwickelt sind, so können wir die Ordnung wohl sehen, uns aber nicht daran erfreuen. Je einfacher der Ausdruck eines Gesetzes ist, desto grösser ist unser Genuss dabei. Daher ziehen wir einfache musikalische Verhältnisse den verwickelteren vor. Consonanz wäre also nach Euler die geistige Befriedigung, die von dem Gewahrwerden eines Gesetzes herrührt, ohne dass Anstrengung des Geistes damit verbunden wäre.

Allein bei dieser Theorie übersah man, dass Pythagoras selbst, der zuerst über diese musikalischen Intervalle Versuche anstellte, nichts von dem Verhältniss der Schwingungen wusste. Man vergass, dass die grosse Mehrzahl derer, die ihre Freude an der Musik und das schärfste Gehör für die Entdeckung einer Dissonanz haben, sich genau in der Lage von Pythagoras befinden und nichts von Schwingungen und deren Verhältnissen wissen. Und man kann füglich hinzusetzen, dass auch

der Gelehrte, der über alle diese Punkte vollkommen unterrichtet ist, dennoch seinen musikalischen Genuss durch diese Kenntnisse nicht gesteigert findet. Euler's Erklärung ist also nicht befriedigend für den Verstand, und es war einem deutschen Naturforscher unserer Tage vorbehalten, nach einer sehr tiefgehenden Analyse der ganzen Frage die physikalische Ursache der Consonanz und der Dissonanz festzustellen; eine Ursache, welche so einfach und befriedigend erscheint, nun sie einmal klar aufgestellt ist, dass man sich nur wundern kann, warum sie so lange auf einen Entdecker warten musste.

Durch die vorausgehenden Vorträge sind wir bereits auf die Helmholtz'sche Erklärung der Consonanz und Dissonanz theilweise vorbereitet. Lassen Sie mich hier einen Versuch wiederholen, der fast von selbst diese Erklärung Ihrem Geiste aufdrängen wird. Sie sehen hier zwei brennende Gasflammen, welche ich in singende Flammen verwandeln kann, indem ich sie in Röhren einschliesse. Die Röhren sind von gleicher Länge, und die Flammen geben den gleichen Ton. Mittelst eines Schiebers verlängere ich die eine Röhre ein wenig; Sie hören jetzt deutliche Schwebungen, die so langsam auf einander folgen, dass man sie mit leichter Mühe zählen kann. Ich verlängere die Röhre abermals um ein Stück. Die Schwebungen folgen einander jetzt so rasch, dass sie kaum mehr gezählt werden können. Offenbar unterscheiden sich die Schwebungen, die Sie jetzt vernehmen, nur durch ihre Schnelligkeit von den langsamen vorhin gehörten Schwebungen. Es findet auch keine Unterbrechung ihrer Continuität statt. Wir beginnen langsam und steigern allmählich die Geschwindigkeit, bis die Schwebungen sich schliesslich so rasch folgen, dass sie jenes eigenthümlich knarrende Geräusch hervor-

bringen, welches jeder Musiker eine Dissonanz nennen würde. Ich will nun den Vorgang umkehren und von den raschen Schwebungen zu langsameren übergehen. Man bemerkt dieselbe Continuität der Erscheinung. Die Schläge trennen sich allmählich mehr und mehr von einander, bis sie schliesslich langsam genug sind, um gezählt werden zu können. So können wir mittelst der singenden Flammen die Schwebungen mit Sicherheit verfolgen, bis sie aufhören, Schläge zu sein, und sich in eine Dissonanz verwandeln.

Dieser Versuch beweist endgültig, dass eine Dissonanz durch eine rasche Folge von Schwebungen hervorgebracht werden kann; und wahrscheinlich wäre diese Ursache der Dissonanz früher entdeckt worden, wenn nicht Young's Theorie der „Combinationstöne" vom rechten Wege abgelenkt hätte. Young hatte die Vorstellung, dass, wenn die Schwebungen sehr schnell erfolgen, sie allmählich in einen Combinationston übergehen. Er glaubte, dass die Tonstösse, welche während der Schwebungen erfolgen, in ähnlicher Weise zusammenwirkten, wie elementare Luftstösse; in dieser Ansicht wurde er durch die bereits erwähnte Thatsache bestärkt, dass der erste Differenzton, d. h. der lauteste Combinationston, ebenso wie die Schwebungen, einer Schwingungszahl entsprach, welche gleich der Differenz der ursprünglichen Schwingungszahlen war. Aber in Wirklichkeit bringen die Schwebungen eine ganz andere Wirkung auf das Ohr hervor, als die regelmässigen Impulse eines gewöhnlichen musikalischen Tones.

§. 3. Das Mitschwingen.

Um die neue Theorie der musikalischen Consonanz in ihrem vollen Umfange zu erfassen, bedarf es einiger Vorstudien. Hier möchte ich Sie bitten, sich der Versuche unserer dritten Vorlesung zu erinnern, bei denen die Theilung einer Saite in ihre harmonischen Abschnitte gezeigt wurde. Dieses geschah durch kleine Papierreiter, welche quer über dieselbe gesetzt wurden, und die von der Saite abgeworfen oder nicht abgeworfen wurden, je nachdem sie sich auf einem der Schwingungsbäuche oder auf einem Knotenpunkt befanden. Vor Ihnen steht das Sonometer, welches wir bei den eben erwähnten Versuchen benutzten. Längs desselben habe ich statt einer Saite zwei Saiten gespannt, und zwar in einer Entfernung von 7,5 cm. Vermittelst eines Schlüssels bringe ich die beiden Saiten zum Einklang. Nun setze ich einen kleinen Papierschnitzel rittlings auf die Mitte der einen Saite und errege die andere. Was geschieht? Die Schwingungen der tönenden Saite theilen sich den Stegen, worauf sie ruht, und von den Stegen der anderen Saite mit. Die einzelnen Anstösse sind sehr schwach, allein weil beide Saiten sich im Einklange befinden, können sich die Impulse so sehr verstärken, dass sie schliesslich den Papierstreifen von der unberührten Saite abwerfen.

Jeder Versuch mit den Papierschnitzeln und der einzelnen Saite, welchen wir in unserer dritten Vorlesung zeigten, kann hier mit den zwei im Einklang befindlichen Saiten wiederholt werden. Wir dämpfen die eine Saite an einem Punkte, der um ein Viertel ihrer Länge von einem Ende absteht, und setzen die

rothen und blauen Reiter nicht auf die Schwingungsknoten und Schwingungsbäuche der gedämpften Saite, sondern auf die denselben genau gegenüber liegenden Punkte auf der anderen Saite. Wenn der Bogen über die kürzere Abtheilung der gedämpften Saite geführt wird, fallen die fünf rothen Reiter der benachbarten Saite ab, während die vier blauen ruhig sitzen bleiben. Wenn ich die eine Saite lockere, so zerstöre ich den Einklang zwischen beiden. Alle Bemühungen, die Reiter abzuwerfen, sind nun umsonst. Jene Verstärkung der Impulse, die der Einklang allein bewirkt, kann hier nicht stattfinden; so gross daher auch die Bewegung in der einen Saite sein mag, so wird es ihr doch nicht gelingen, einen merklichen Einfluss auf die andere auszuüben.

Die Wirkung des Einklanges kann noch auffallender gezeigt werden durch zwei Stimmgabeln, welche denselben Ton angeben. Ich setze zwei solche auf ihren Resonanzkästen befestigte Stimmgabeln auf den Tisch und streiche mit dem Bogen kräftig über eine derselben hin, während die andere unberührt bleibt. Wenn ich die erregte Stimmgabel anhalte, so wird der Ton wohl schwächer, ohne jedoch ganz aufzuhören. Durch die Luft und das Holz sind die Schwingungen von Gabel zu Gabel getragen worden, und der Ton, welchen Sie jetzt hören, rührt von der unberührten Gabel her. Belaste ich die eine Gabel mit einer kleinen Münze, so versagt ihr Einfluss auf die andere; die Veränderung in der Schwingungszahl, so gering sie ist, reicht hin, um die Sympathie zwischen den beiden Gabeln zu zerstören, und nun ist keine Antwort mehr möglich. Entferne ich die Münze, so antwortet die unberührte Stimmgabel wie zuvor.

Diese Ueberleitung der Schwingungen durch Luft

und Holz kann auch dann noch hervorgebracht werden, wenn die Entfernung zwischen den auf ihren Resonanzkästen befestigten Gabeln 1 — 2 m beträgt. Allein die Schwingungen können auch bloss durch die Luft mitgetheilt werden. Ich halte den Kasten einer lebhaft schwingenden Gabel in der Hand und bringe eine ihrer Zinken an die ruhende Gabel heran, so zwar, dass die Zinken mit der Rückseite gegen einander gekehrt sind, jedoch noch ein Luftraum zwischen ihnen sich befindet. So körperlos das Uebertragungsmittel ist, so ermöglicht die Verstärkung der Impulse, welche durch den vollkommenen Einklang der beiden Gabeln entsteht, es doch der einen Gabel, die andere in Schwingung zu versetzen. Lösche ich den Ton der erregten Gabel plötzlich aus, so klingt die zuvor stille Gabel weiter, da sie die Schwingungen ihrer Nachbarin aufgenommen hat. Ich nehme die eine Gabel von ihrem Resonanzkasten ab, schlage sie an und versetze sie dadurch in heftige Schwingung. Frei in die Luft gehalten, ist ihr Ton unhörbar. Sobald sie aber der auf dem Gestell befindlichen stillen Gabel genähert wird, erhebt sich aus der Stille ein voller, weicher Ton, der nicht der ursprünglich klingenden Gabel, sondern ihrer Nachbarin zuzuschreiben ist.

Verschiedene andere bereits erörterte Beispiele von dem Einflusse des Synchronismus werden Ihnen hierbei einfallen, und man könnte derlei Fälle leicht vervielfältigen. Wenn z. B. zwei Uhren mit Pendeln von derselben Schwingungsdauer an derselben Wand hängen und man eine derselben in Bewegung setzt, so wird das Ticken der gehenden Uhr sich durch die Wand der anderen mittheilen und diese erregen. Das Pendel, das durch ein einzelnes Ticken bewegt wird, beschreibt einen ausserordentlich kleinen Bogen, allein es kehrt zu seiner

Schwingungsgrenze gerade zu rechter Zeit zurück, um einen neuen Anstoss zu empfangen. Durch die Fortdauer dieses Vorganges addiren sich die Anstösse schliesslich so, dass sie die Uhr zum Gehen bringen. Durch dieses Abstimmen der Luftstösse kann ein gesungener Ton von passender Höhe ein Glas zum Tönen bringen, und der Klang einer Orgel kann unter Umständen Fensterscheiben zerbrechen.

§. 4. Das Mitschwingen in seinen Beziehungen zum menschlichen Ohre.

Ich verweile auf diesem Gegenstande, damit Ihnen die Art und Weise, wie eine Tonwelle sich dem Hörnerven mittheilt, verständlicher werde. Beim menschlichen Gehörorgan haben wir zunächst den äusseren Gehörgang, der an seinem inneren Ende durch das kreisförmige Trommelfell geschlossen ist. Hinter dieser Membran befindet sich die Höhle, welche die Trommel genannt wird, und die vom Gehirn durch eine knöcherne Scheidewand getrennt ist, in der sich ein rundes und ein ovales Loch befindet. Auch diese Löcher sind durch feine Membranen geschlossen. Quer über die Trommelhöhle zieht sich eine Reihe von vier kleinen Knöchelchen hin. Das erste, der Hammer, ist an das Trommelfell befestigt; das zweite, der Amboss, ist durch ein Gelenk mit dem Hammer verknüpft; ein drittes rundes Knöchelchen verbindet den Amboss mit dem Steigbügel, dessen ovale Basis an der Membran der ovalen vorhin erwähnten Oeffnung befestigt ist. Die Basis des Steigbügels flacht sich gegen die Membran hin ab und bedeckt sie beinahe ganz, so dass nur ein schmaler Streifen derselben das Knöchelchen umgiebt. Hinter der knöchernen

Scheidewand, und zwar zwischen dieser und dem Gehirn, haben wir ein eigenthümliches Organ, das Labyrinth, das mit Wasser angefüllt ist, und feine häutige Gebilde enthält, an denen die Endfasern des Gehörnerven ausgebreitet sind. Wenn das Trommelfell einen Stoss empfängt, so wird dieser durch die oben genannte Reihe von Knöchelchen weiter geführt und an der Membran, gegen welche die Basis des Steigbügels befestigt ist, concentrirt. Diese Membran theilt den Stoss dem Wasser des Labyrinthes mit, welches ihn seinerseits auf die Nerven überträgt.

Diese Uebertragung ist jedoch nicht direct. An einer gewissen Stelle des Labyrinthes wachsen zwischen den Nervenfasern äusserst feine elastische Härchen, die in scharfen Spitzen auslaufen. Diese von Max Schultze entdeckten Härchen sind ausserordentlich geeignet, mit den Schwingungen des Wassers, welche ihren eigenen Schwingungsperioden entsprechen, mitzuschwingen. Auf diese Weise in Schwingung versetzt, erregen diese Härchen die zwischen ihren Wurzeln liegenden Nervenfasern, und von da aus die Gehörempfindung. An einer anderen Stelle des Labyrinthes haben wir kleine krystallinische Theilchen, die Gehörsteine, welche zwischen Nervenfasern gelagert sind, und die beim Schwingen einen intermittirenden Druck auf die benachbarten Nervenfasern ausüben und auf diese Weise das Gehör erregen. Diese Hörsteinchen dienen wahrscheinlich einem anderen Zwecke, als die durch Schultze entdeckten Hörhärchen. Sie sind durch ihr Gewicht geeignet, Schwingungen leicht verhallender Töne, welche vielleicht sonst unbemerkt bleiben würden, andauernder zu machen. Die Schultze'schen Hörhärchen würden im Gegentheil wegen ihrer sehr grossen Leichtigkeit nach

einem vorübergehenden Ton schnell zur Ruhe kommen, während sie in ausgezeichneter Weise für die Aufnahme eines andauernden Tones sich eignen.

Schliesslich findet sich in dem Labyrinth noch ein durch den Marchese Corti entdecktes Organ, das allem Anscheine nach ein musikalisches Instrument ist. Die Saiten desselben sind so gespannt, dass sie Schwingungen verschiedener Perioden annehmen und auf die das Organ durchlaufenden Nervenfasern übertragen. Seit Jahrtausenden besteht also innerhalb des menschlichen Ohres eine Harfe von 3000 Saiten[1]), welche ohne unser Wissen und Zuthun die Musik der Aussenwelt empfängt und dem Gehirn zuträgt. Jedes musikalische Erbeben, welches dieses Organ trifft, wählt sich unter dessen gespannten Fasern diejenige aus, die seiner eigenen Tonhöhe entspricht, und versetzt sie in übereinstimmende Schwingungen. So können jene mikroskopischen Saiten jede, auch die verwickeltste Bewegung der äusseren Luft analysiren und in ihre Bestandtheile zerlegen. Wahrlich, der menschliche Geist, der sich einem solchen Wunder gegenüber verschliessen könnte, müsste unvollkommen organisirt sein.

§. 5. Consonante Intervalle in ihren Beziehungen zum menschlichen Ohre.

Diese Ansicht von der Wirksamkeit der Corti'schen Fasern ist theoretisch; allein sie empfiehlt sich durch ihre Wahrscheinlichkeit. Durch sie werden wir in Stand gesetzt, Dinge zu verknüpfen, deren Beziehungen sonst

[1]) Dies ist nach Kölliker die Zahl der Fasern des Corti'schen Organes.

schwer zu erkennen wären. Wenn ein musikalischer Ton erklingt, so tönt die entsprechende Corti'sche Faser mit, ebenso wie eine Saite durch eine zweite, gleichtönende Saite erregt wird. Und wenn sich zwei Töne vereinigen, um Schwebungen zu bilden, so wird die intermittirende Bewegung der passenden Faser innerhalb des Ohres mitgetheilt. Hier ist jedoch zu beachten, dass, wenn zwei verschiedene Töne dieselbe Faser erregen sollen, die Tonhöhe der Faser nicht zu stark von der jener Töne abweichen darf. Man erinnere sich unserer Wiederholung des Melde'schen Versuchs (dritte Vorlesung). Wie Sie damals mehrfach bemerkt haben, beginnt die mit der Stimmgabel verbundene Seite der Gabel zu antworten, noch ehe der Einklang zwischen beiden vollständig hergestellt ist. Sie bemerkten aber auch, wie rasch die Schwingungsamplitude der Saite zunahm, sobald sie sich dem vollkommenen Einklange mit der Gabel näherte. Im Augenblick der Annäherung betrug die Amplitude etwa $2^1/_2$ cm; alsdann stellte eine leichte Spannung oder Lockerung der Saite den Einklang her und sofort erweiterte sich die Amplitude auf 15 cm.

Ebenso verhält es sich bei dem soeben ausgeführten Versuche mit dem Sonometer. Ehe der Papierreiter abgeworfen wird, beginnt er zu flattern; ein Beweis, dass die Saite schon vor dem Eintritt vollständigen Einklanges angefangen hat, mitzuschwingen. Man denke sich den Sonometer nicht mit zwei, sondern mit drei Saiten von nahezu derselben Tonhöhe bespannt. Die Schwingungsperiode der mittleren Saite soll zwischen den Schwingungsperioden der beiden anderen liegen, in der Weise, dass sie etwas höher als die eine und etwas tiefer als die andere ist. Jede der Nachbarsaiten würde,

wenn sie einzeln ertönte, die mittlere Saite erregen. Wenn beide Saiten gleichzeitig ertönten, würden sie Schwebungen erzeugen; die entsprechende Intermittenz würde sich der mittleren Saite mittheilen und sie würde im Einklange mit den Schwebungen ihrer Nachbarn zu schlagen beginnen. Auf diese Weise veranschaulichen wir uns, wie eine Corti'sche Faser bis zu einem gewissen Grade die Schwingungen eines Tones aufnehmen kann, der beinahe, aber nicht ganz mit ihr im Einklang ist; und dass zwei Töne, die sich der Tonhöhe der Faser nähern, wenn sie gleichzeitig auf diese einwirken, durch ihre Schwebungen der Faser eine intermittirende Bewegung mittheilen. Diese Fähigkeit des Mitschwingens würde auf beiden Seiten des vollkommenen Einklanges rasch abnehmen, so dass, wenn das Intervall zwischen den zwei Tönen zunähme, dieselbe Faser sehr bald nicht mehr von beiden zugleich erregt werden würde. An diesem Punkt würde das Auffassungsvermögen des Organes für Schwebungen aufhören.

In der mittleren Lage des Claviers sind bei einem Intervall von einem halben Ton die Schwebungen scharf und deutlich; sie berühren das Ohr als rauhe Dissonanz. Erweitert man das Intervall zu einem ganzen Ton, so werden die Schwebungen schneller, aber undeutlicher. Bei einem Intervall von einer kleinen Terz zwischen beiden Tönen sind in dem mittleren Theile der Tonleiter die Schwebungen nicht mehr hörbar. Aber diese Glätte des Tones ist nicht bloss der zunehmenden Geschwindigkeit der Schwebungen zuzuschreiben. Sie rührt zum Theil auch her von einem Umstande, auf den wir durch die vorhergehenden Betrachtungen bereits vorbereitet sind, dass nämlich die zwei Töne zu stark von der Tonhöhe der zwischen ihnen liegenden Corti'schen

Faser abweichen, um sie noch wesentlich zu afficiren. Wenn wir die Tonleiter hinaufgehen, können wir bei Intervallen, die enger sind als die kleine Terz, eben so viel oder noch mehr Schwebungen erzeugen, die noch deutlich erkennbar sind, weil ihre erregenden Töne näher zusammen liegen. In den höchsten Gegenden der Tonleiter hingegen, wo die Schwebungen sehr schnell werden, unterscheidet sie das Ohr nicht mehr als Rauhigkeit.

Demnach hat bei der Consonanz sowohl die Geschwindigkeit der Schwebungen als auch die Grösse des Intervalls mitzusprechen. Helmholtz nimmt an, dass in den mittleren und höheren Theilen der Tonleiter, wo 33 Schwebungen in der Secunde stattfinden, die Dissonanz ihren höchsten Grad erreicht. Sowohl langsamere wie schnellere Schwebungen wirken weniger rauh und unangenehm. Wenn die Schwebungen sehr langsam erfolgen, können sie musikalisch wirksam sein; und wenn sie 132 in der Secunde erreichen, verschwindet ihre Rauhigkeit vollständig.

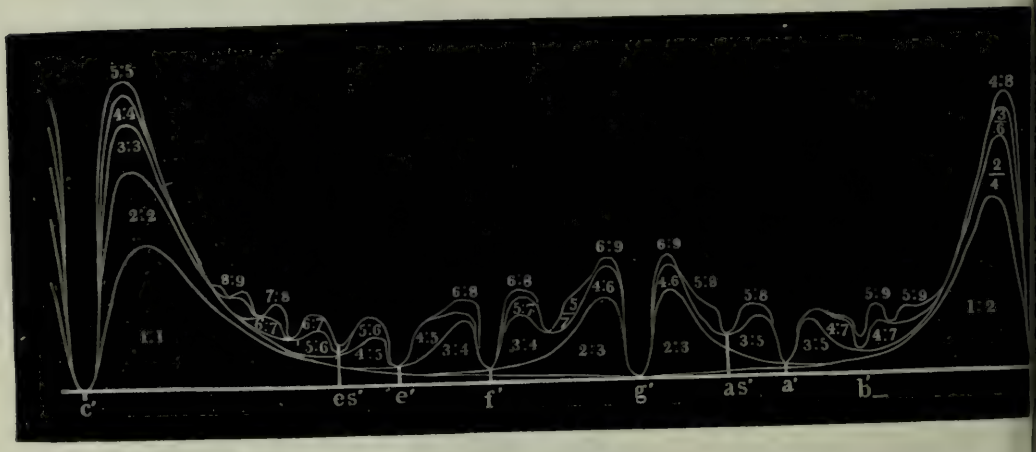
Dank der Untersuchungen von Helmholtz, dessen Ansichten ich hier in möglichster Kürze wiederzugeben versucht habe, sind wir jetzt in der Lage, die Frage der musikalischen Intervalle zu lösen und zu erklären, weshalb einige dem Ohre wohlklingen, andere nicht. Es ist unser Loos auf dieser Erde, dass alle unsere Gefühle und Regungen, von der niedrigsten Empfindung an bis zum höchsten ästhetischen Bewusstsein, eine mechanische Ursache haben; wenn es uns auch auf ewig versagt bleiben mag, den Schritt von Ursache zu Wirkung zu thun, oder zu begreifen, warum die Erregung gewisser Nervenmassen jenes Vergnügen erweckt, das uns die Musik bereitet. Wir wollen uns z. B. eine Violine denken. Der Grundton jeder Saite dieses Instrumentes ist nachweisbar von

einer Menge von Obertönen begleitet; wenn zwei Violinen erklingen, haben wir nicht nur die Consonanz oder Dissonanz ihrer Grundtöne, sondern auch die der Obertöne beider Instrumente in Betracht zu ziehen. Angenommen, es tönen zwei Saiten, deren Grundtöne und Partialtöne übereinstimmen, so haben wir absoluten Einklang; dies ist in der That der Fall, wenn das Schwingungsverhältniss wie 1 : 1 ist. Auch wenn das Schwingungsverhältniss genau wie 1 : 2 ist, befindet sich jeder Oberton des Grundtones in absoluter Uebereinstimmung entweder mit dem Grundton oder mit irgend einem höheren Ton der Octave. Es ist kein Platz für Schwebungen oder Dissonanzen. Untersuchen wir das Intervall einer Quinte mit einem Verhältniss von 2 : 3, so stimmen die Partialtöne der beiden Saiten noch so weit überein, dass sie fast, wenn auch nicht ganz, jede Spur einer Dissonanz ausschliessen. Wenn wir aber zu den übrigen Intervallen kommen, zeigt sich, dass die Uebereinstimmung der Partialtöne unvollkommener wird, in dem Maasse wie die Zahlen, die das Schwingungsverhältniss ausdrücken, wachsen. Die Dissonanz solcher Intervalle, deren Schwingungsperioden nur durch hohe Zahlen ausgedrückt werden können, ist also keiner mystischen Eigenschaft jener Zahlen zuzuschreiben, sondern vielmehr dem Umstande, dass die Grundtöne, die solche Zahlen fordern, unvermeidlich von Partialtönen begleitet werden, deren Zusammenklang Schwebungen verursacht, und dass diese Schwebungen jene eigenthümliche Rauhigkeit hervorrufen, die wir Dissonanz nennen.

§. 6. Graphische Darstellung der Consonanz und Dissonanz.

Helmholtz hat es versucht, dieses Resultat graphisch darzustellen, und ich entnehme seinem Werke die zwei nachfolgenden Diagramme. Er nimmt, wie gesagt, an, dass das Maximum der Dissonanz 33 Schlägen in der Secunde entspricht, und er sucht die verschiedenen Grade der Dissonanz durch Linien von verschiedener Länge auszudrücken. Die horizontale Linie $c'\,c''$ (Fig. 179)

Fig. 179.



stellt den Umfang der musikalischen Tonleiter vor, in der c'' unser mittleres C mit 528 Schwingungen und C' die tiefe Octave von c'' ist. Die Entfernung zwischen irgend einem Punkte dieser Linie und der darüber liegenden Curve stellt die Dissonanz vor, welche diesem Punkte entspricht. Es wird hier angenommen, dass die Tonhöhe allmählich und nicht sprungweise steigt. Nehmen wir zum Beispiel an, dass zwei Violinspieler mit demselben Ton c' anfangen, und dass, während der eine denselben hält, der andere allmählich und continuirlich

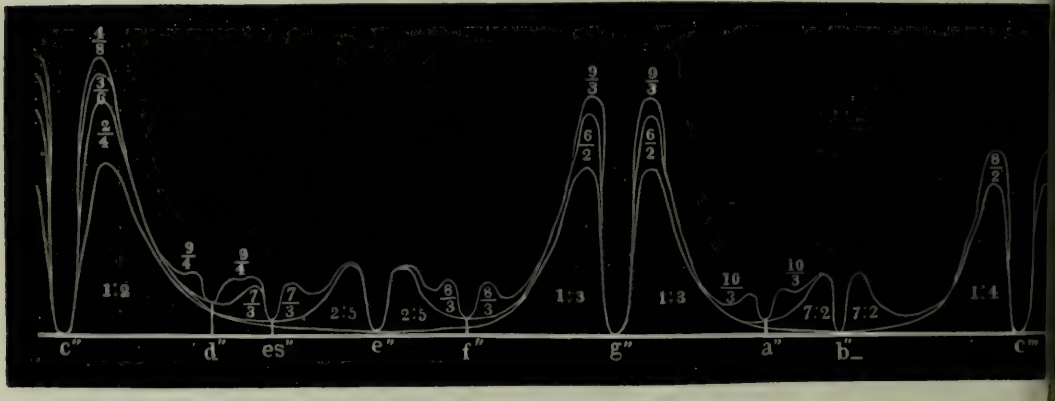
seine Saite verkürzt, bis er die Tonhöhe der Octave c'' erreicht hat. Die Wirkung auf das Ohr wird durch die unregelmässigen Curven der Linien in Fig. 179 dargestellt. Bald nachdem der Einklang, welcher hier durch den Zusammenstoss beider Linien bei c' dargestellt ist, aufgehört hat, erhebt sich die Curve plötzlich und zeigt, dass die hier stattfindende Dissonanz die stärkste von allen ist. Bei e nähert sich die Curve der geraden Linie $c'c''$, und dieser Punkt der Curve entspricht der grossen Terz. Bei f' ist die Annäherung noch grösser, und dieser Punkt entspricht der Quarte; bei g' berührt die Curve beinahe die gerade Linie, wodurch angedeutet wird, dass bei der Quinte, welche diesem Punkte entspricht, die Dissonanz fast ganz aufgehört hat. Bei a' haben wir die grosse Sexte, während bei c'', welches die Octave von c' ist, die Dissonanz wieder ganz verschwindet. Das es' und as' des Diagrammes bedeuten die kleine Terz und die kleine Sexte.

Wenn wir mit der Steigerung des einen Tones fortfahren, während der Grundton c', von welchem wir vorher ausgingen, als tieferer Ton des Intervalls festgehalten wird, so zeigt die Fig. 180 (a. f. S.) die verschiedenen Grade der Consonanz und Dissonanz. Dieselbe beginnt mit $c'c''$ und reicht bis zur Doppeloctave $c'c'''$, wobei die krumme Linie die Wirkung auf das Ohr darstellt. Wir sehen aus diesen beiden Curven, dass fast immer Dissonanz stattfindet, und dass die Dissonanzen nur an gewissen Punkten verschwinden oder zu schwach werden, um die Harmonie zu stören. Diese Punkte entsprechen den Stellen, wo das Schwingungsverhältniss sich durch niedrige gerade Zahlen ausdrücken lässt. Man erinnere sich, dass diese Curven auf die Voraussetzung hin construirt sind, die Schwebungen seien die Ursache der Dissonanz; und

die Uebereinstimmung zwischen der Berechnung und Erfahrung erweist genügend die Richtigkeit dieser Annahme.

Sie haben mich nun an die Grenze des physikalischen Theiles der Akustik begleitet; Sie in das ästhetische Gebiet derselben einzuführen, ist jedoch nicht meine Aufgabe. Ich will nur noch hinzufügen, dass, wenn wir drei oder mehr Töne vergleichen, d. h., wenn wir sie als Tonstufen einer Melodie wählen, wir durch die eben angeführten Principien geleitet werden. Wir wählen solche Töne, welche sowohl mit dem Grundtone

Fig. 180.



als gegenseitig harmonische Verhältnisse haben. Bei der Auswahl einer Reihe von paarweisen Tonverbindungen würde uns schon die Einfachheit der Zahlenverhältnisse auf die Töne führen, welche durch die Zahlen 1, $^5/_4$, $^4/_3$, $^3/_2$, $^5/_3$, 2 ausgedrückt werden, indem dies die einfachsten Verhältnisse sind, welche wir innerhalb einer Octave haben können. Allein wenn man die durch diese Zahlen ausgedrückten Töne nach einander klingen lässt, wird man finden, dass die Intervalle zwischen 1 und $^5/_4$ und zwischen $^5/_3$ und 2 grösser als die übrigen sind, und dass sie der Einschiebung eines anderen Tons noch in beiden

Fällen bedürfen. Die gewählten Töne sind solche, die Accorde bilden, nicht mit dem Grundtone, sondern mit dem Tone $^3/_2$, der als Grundton betrachtet wird. Das Verhältniss dieser beiden Töne zum Grundtone ist $^9/_8$ und $^{15}/_8$. Indem man diese Töne einschiebt, haben wir die acht Töne der natürlichen oder diatonischen Scala, wie sie durch die folgenden Benennungen und Zahlenverhältnisse ausgedrückt werden:

Benennung	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*A*	*H*	*C*
Intervalle	Prime	Secunde	Terze	Quarte	Quinte	Sexte	Septime	Octave
Schwingungszahlen	1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2

Indem man diese Zahlen durch 24 multiplicirt, um Brüche zu vermeiden, ergiebt sich die folgende Reihe von ganzen Zahlen, welche das Verhältniss der Schwingungszahlen der Töne der diatonischen Scala ausdrücken:

24, 27, 30, 32, 36, 40, 45, 48.

Die Bedeutung der Benennungen Terz, Quarte, Quinte etc., welche wir bereits so oft auf die musikalischen Intervalle angewendet haben, wird jetzt ersichtlich; dieselben beziehen sich auf die Stellung der Töne in der Scala.

§. 7. Zusammensetzung der Schwingungen.

Schon in unserer zweiten Vorlesung erläuterte ich an einigen Beispielen eine Methode von Lissajous, um musikalische Schwingungen zu beobachten. Vermittelst eines Lichtstrahles, der von einem an der Stimmgabel befestigten Spiegel zurückgeworfen wurde, konnte man die Stimmgabel dazu bringen, ihre eigene Bewegung aufzuschreiben. Bei unserer letzten Vorlesung wurde

dieselbe Methode angewendet, um die Erscheinung der Schwebungen optisch zu zeigen. Ich schlage nun vor, diese Methode auch auf die Untersuchung von der Zusammensetzung der Schwingungen anzuwenden, welche die hauptsächlichsten Intervalle der diatonischen Scala bilden. Um diesen Gegenstand vollständig zu verstehen, müssen wir uns jedoch durch eine kurze Untersuchung der Schwingungen eines gewöhnlichen Pendels vorbereiten.

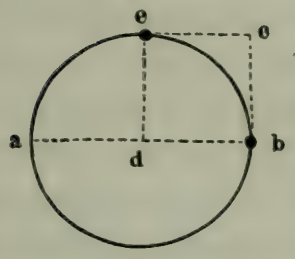
Ein solches Pendel hängt hier vor Ihnen. Es besteht aus einem Drahte, der sorgfältig an einer Eisenplatte am Dache dieses Hauses befestigt ist und der eine 5 kg schwere Kupferkugel trägt. Wenn ich das Pendel auf die Seite ziehe und loslasse, so schwingt es in beinahe derselben Ebene hin und her.

Ich sage „beinahe“, weil es in der Wirklichkeit unmöglich ist, ein Pendel so aufzuhängen, dass es nicht ein wenig von der vollkommenen Symmetrie rings um seinen Ruhepunkt abweicht. In Folge dessen entfernt sich das Gewicht früher oder später von der geraden Linie und beschreibt ein längeres oder kürzeres Oval. Dieser Umstand bereitete vor etlichen Jahren denjenigen grosse Schwierigkeiten, welche Foucault's berühmten Versuch zum Beweise der Drehung der Erde wiederholen wollten.

In dem jetzt vorliegenden Falle ist jedoch das Pendel so sorgfältig befestigt, dass seine Abweichung von der geraden Linie anfangs nicht bemerkbar ist. Angenommen, seine Schwingungsweite sei durch die punktirte Linie ab (Fig. 181) angezeigt. Der Punkt d, in der Mitte zwischen a und b, ist der Ruhepunkt des Pendels. Wird es von diesem Punkte bis zu b gezogen und dann losgelassen, so wird es bis d zurückkehren

und in Folge seines Beharrungsvermögens bis a weiter schwingen. Hier kommt es zu einer momentanen Ruhe und kehrt über d nach b zurück. Und so wird es fortfahren zu schwingen, bis seine Bewegung erschöpft ist.

Fig. 181.



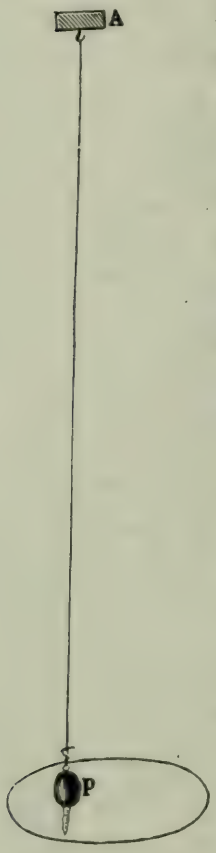
Nachdem das Pendel seine Schwingungsgrenze bei b erreicht hat, nehmen wir an, es erhalte einen Stoss in einer zu ab senkrechten Richtung, d. h. in der Richtung bc. Angenommen, das Pendel bedürfe einer Secunde, um von b nach a zu schwingen, so wird die Zeit seines Weges von b nach d eine halbe Secunde betragen[1]). Angenommen ferner, die Kraft, welche in b einwirkt, sei so gross, dass sie das Gewicht, falls dieses sich nur in dieser einen Richtung bewegen könnte, in einer halben Secunde nach c führen würde, und dass die Entfernung bc gleich der von bd ist, so entsteht die Frage: wo wird sich das Gewicht in der That nach einer halben Secunde befinden? Es ist ganz klar, dass beide Kräfte zur vollkommenen Wirkung kommen, wenn das Pendel in einer halben Secunde den Punkt e, der gerade dem Centrum d gegenüber liegt, erreicht hat. Um diesen Punkt zu erreichen, kann gezeigt werden, dass es den kreisförmigen Bogen be beschreiben muss, und es wird seinen Weg in demselben Bogen nach a fortsetzen und ebenso zu b zurückkehren. Auf diese Weise wird die hin und her gehende Schwingung durch den recht-

[1]) Diese Annahme ist natürlich nur der Einfachheit halber gemacht worden, indem die wirkliche Schwingungsperiode eines 8,68 m langen Pendels zwischen zwei und drei Secunden beträgt.

winkelig dagegen gerichteten Stoss in eine Drehung verwandelt, und das Pendel beschreibt dabei einen Kreis, wie Fig. 182 es zeigt.

Wenn die bei b angewendete Kraft gross genug ist, um das Gewicht innerhalb einer halben Secunde durch eine grössere Entfernung als bc zu treiben, so wird das Pendel eine Ellipse beschreiben, deren kleinere Axe die Linie ab sein wird; wenn im Gegentheil die bei b angewendete Kraft das Pendel innerhalb einer halben Secunde durch eine kleinere Entfernung als bc treibt, so wird das Pendel eine Ellipse beschreiben, deren grössere Axe die Linie ab sein wird.

Fig. 182.



Untersuchen wir nun, was geschieht, wenn der seitliche Stoss in dem Augenblicke erfolgt, wo das Pendelgewicht durch seinen Ruhepunkt d geht. Angenommen, das Pendel bewege sich

Fig. 183.

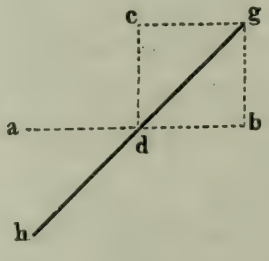
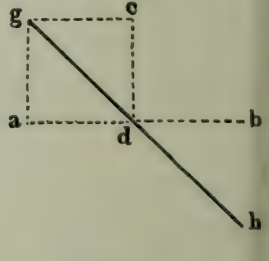


Fig. 184.



von a nach b (Fig. 183) und erhalte bei d einen Stoss, der an und für sich genügend wäre, es in einer halben Secunde nach c zu treiben, so ist es klar, dass die resultirende Bewegung längs der geraden Linie dg, die zwischen db und dc liegt, stattfinden wird. Das Pendel wird längs dieser Linie nach d zurückkehren und weiter

bis h gehen. In diesem Falle wird das Pendel demnach eine gerade Linie gh beschreiben, die schräg zu seiner ursprünglichen Schwingungsrichtung verläuft.

Angenommen, die Richtung der Bewegung sei von b nach a, anstatt von a nach b in dem Augenblick, wo ihm der Stoss mitgetheilt wird, so ist es klar, dass die resultirende Bewegung hier abermals eine gerade Linie ist, die schräg zu der ursprünglichen Richtung der Schwingung verläuft; allein die schräge Linie wird diesmal die in Fig. 184 dargestellte sein.

Wenn der Impuls dem Pendel weder im Centrum noch am Endpunkte seiner Schwingung, sondern an

Fig. 185.

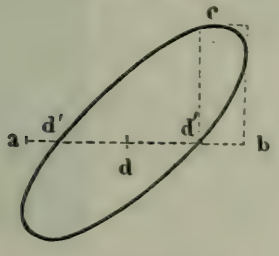
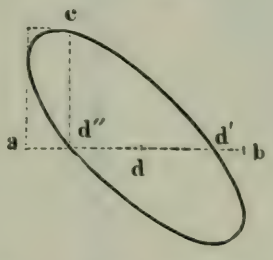


Fig. 186.

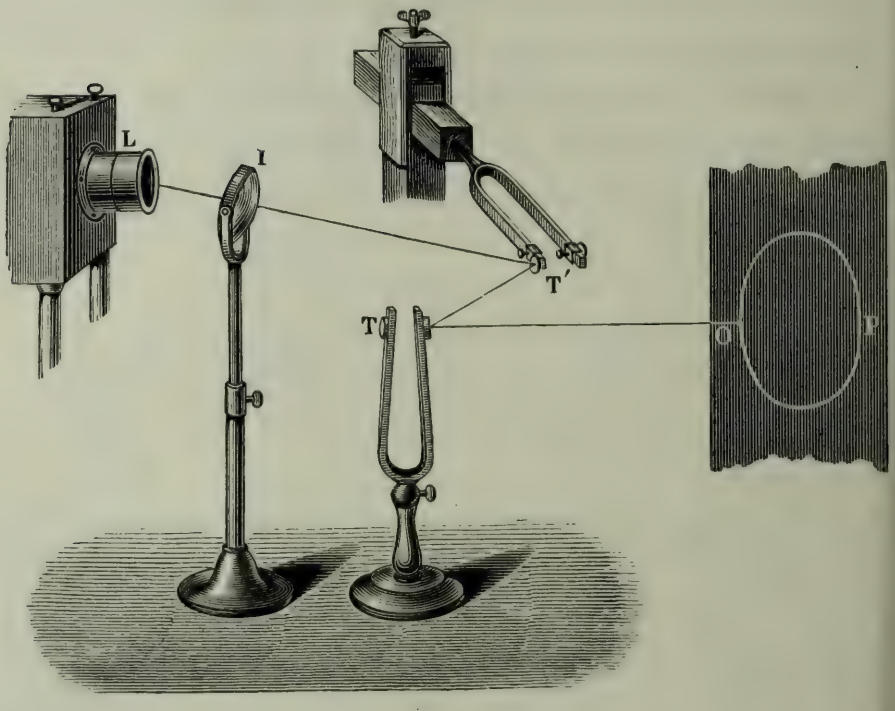


irgend einem Punkte zwischen beiden mitgetheilt wird, so erhalten wir weder einen Kreis noch eine gerade Linie, sondern etwas, das zwischen beiden liegt. Wir haben eine mehr oder weniger verlängerte Ellipse, deren Axe schräg zu $a\,b$, der ursprünglichen Schwingungsrichtung, liegt. Wenn der Stoss zum Beispiel in d' (Fig. 185) erfolgt, während das Pendel sich in der Richtung nach b bewegt, wird die Stellung der Ellipse diejenige sein, die in Fig. 185 gezeichnet ist; allein, wenn der Stoss bei d' erfolgt, während die Bewegung nach a hin stattfindet, so wird die Stellung der Ellipse die in Fig. 186 dargestellte sein.

Durch die Methode von Lissajous können wir die zu einander rechtwinkeligen Schwingungen von zwei

Stimmgabeln verbinden; und dies ist der Gegenstand, den ich Ihnen jetzt gern zeigen möchte. Vor einer elektrischen Lampe L (Fig. 187) befindet sich eine grosse Stimmgabel T', die mit einem Spiegel versehen ist, auf den ich einen schmalen Lichtstrahl LT' fallen lasse. Der Strahl wird reflectirt. In die Bahn dieses reflectirten Strahles setze ich eine zweite senkrechte Stimmgabel T,

Fig. 187.



welche auch mit einem Spiegel versehen ist. Wenn die horizontale Stimmgabel schwingt, wird der Strahl in seitlicher Richtung bewegt; wenn die senkrechte Stimmgabel schwingt, wird er in senkrechter Richtung bewegt. Gegenwärtig sind beide Gabeln ruhig. Der Lichtstrahl wird vom Spiegel der horizontalen zu dem der senkrechten Gabel, und von letzterem auf den Schirm geworfen, wo er eine glänzende Scheibe bildet. Wenn ich nun den Ton der aufrechten Gabel errege,

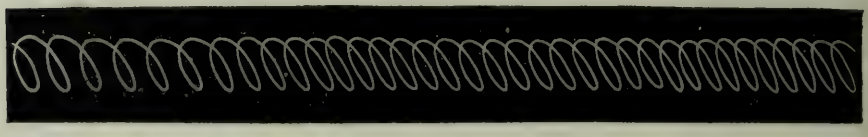
während die andere ruhig bleibt, so zieht sich die Scheibe in einen schönen, leuchtenden, meterlangen Streifen aus. Lasse ich nun die zweite Gabel tönen, so verwandelt sich der gerade Streifen augenblicklich in einen prächtigen weissen Ring *OP* (Fig. 187) von 90 cm Durchmesser. Wir haben hier genau dasselbe vorgenommen, was wir bei unserem ersten Versuche mit dem Pendel thaten. Wir haben einen Lichtstrahl gleichzeitig nach zwei verschiedenen Richtungen hin schwingen lassen, und haben es zufällig so getroffen, dass eine Gabel gerade ihre Schwingungsgrenze erreicht hatte und zu momentaner Ruhe gekommen war, während der Strahl den Maximalimpuls der anderen Gabel erhielt.

Es ist, wie gesagt, ein blosser Zufall, dass wir einen Kreis erzielten; allein es war ein glücklicher Zufall, da er uns gestattet, uns von der genauen Aehnlichkeit zwischen der Bewegung des Lichtstrahles und der des Pendels zu überzeugen. Ich halte beide Gabeln an und lasse sie von Neuem tönen. Sie haben nun eine Ellipse mit schräger Axe vor sich. Nach einigen Versuchen erlangen wir die gerade Linie, die uns zeigt, dass beide Gabeln zu gleicher Zeit ihre Gleichgewichtslage haben. Indem wir auf diese Weise die Schwingungen von zwei Gabeln verbinden, wiederholen wir alle Figuren, welche das Pendel zuvor beschrieb.

Wenn die Schwingungen zweier Gabeln in jeder Beziehung gleich sind, so bleibt die Figur, welche sie auf dem Schirme hervorbringen, in der Form unverändert, und nimmt nur mit dem Aufhören der Bewegung an Grösse ab. Allein der kleinste Unterschied im Schwingungsverhältniss zerstört diese Gleichmässigkeit des Bildes. Ich habe vor der Vorlesung den Einklang dieser beiden Gabeln so vollkommen als möglich her-

gestellt, und daher bemerken Sie nur geringe Veränderungen an der Form der Figur. Allein wenn ich ein kleines Gewicht auf der Zinke der einen Gabel entlang schiebe, oder ein Stück Wachs auf einer der Gabeln anbringe, störe ich den Einklang; die Figur geht langsam aus einer geraden Linie in eine schräge Ellipse und von da in einen Kreis über, worauf sie sich abermals zu einer Ellipse von entgegengesetzter Axenrichtung zusammenzieht und alsdann zu einer geraden Linie wird, deren Richtung im rechten Winkel zur ersten steht; und schliesslich geht sie in umgekehrter Ordnung durch dieselbe Reihenfolge von Figuren wieder zu der geraden Linie zurück, mit der wir angefangen haben. Die Zeit,

Fig. 188.



die nöthig ist, bis eine dieser Figuren sich identisch wiederholt, entspricht der Zeit, die eine Gabel braucht, um der anderen um eine ganze Schwingung vorauszukommen. Belaste ich die Gabel noch mehr, so haben wir noch rascheren Wechsel, so dass die gerade Linie, die Ellipse und der Kreis in rascher Reihenfolge durcheilt werden. Zuweilen zeigt die leuchtende Curve eine scheinbare stereoskopische Tiefe, die beinahe den Eindruck macht, als hätten wir einen festen Ring von weissglühendem Metall vor uns.

Wenn ich den Spiegel der Gabel T' durch einen kleinen Bogen sich drehen lasse, ziehe ich den festen Kreis zu einer leuchtenden Spirale aus, welche sich quer über den Schirm ausdehnt (Fig. 188). Wird derselbe

Versuch mit der wechselnden Figur ausgeführt, die entsteht, wenn man den Einklang der Gabeln stört, so erscheint eine Spirale von ungleicher Breite (Fig. 189)[1]).

Nunmehr haben wir die Schwingungen zweier Gabeln zu vergleichen, wovon die eine doppelt so schnell vibrirt als die andere, d. h. die Figur festzustellen, welche der

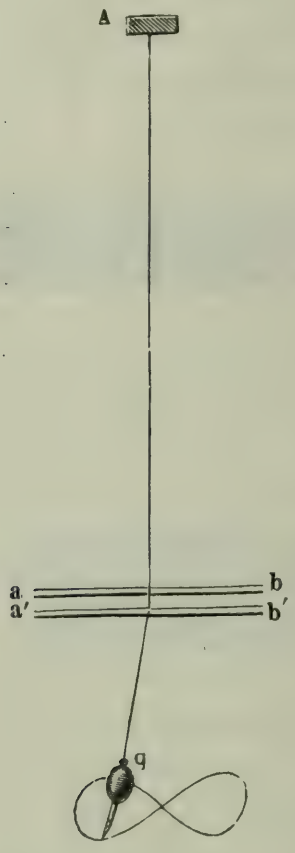
Fig. 189.

Verbindung eines Tones mit seiner Octave entspricht. Um uns für den mechanischen Theil unserer Aufgabe vorzubereiten, müssen wir wieder zu unserem Pendel zurückkehren; denn auch dieses kann nach einer Richtung hin doppelt so schnell als nach der anderen oscilliren. Durch einen sehr complicirten mechanischen Apparat könnte man dies sehr vollkommen ausführen; allein hier ist Einfachheit der Vollkommenheit vorzuziehen. Der Draht unseres Pendels hängt von seinem Befestigungspunkte A (Fig. 190, a. f. S.) gerade herunter zwischen zwei horizontalen Glasstäben ab und $a'b'$, welche an ihren Enden befestigt und ungefähr 2,5 cm von einander getrennt sind. Die Stäbe kreuzen den Draht etwa 2 m oberhalb des Pendelgewichtes. Die ganze Länge des Pendels beträgt 8 m, also schneiden die Glasröhren ein Viertel derselben ab. Ich ziehe das Pendel in der Richtung der Stäbchen ab, $a'b'$ zur Seite und lasse es gehen. Es bewegt sich frei zwischen denselben und schwingt seiner ganzen Länge nach hin und

[1]) Diese Figur entspricht dem Intervall 15 : 16. Diese und andere Figuren verdanke ich dem ausgezeichneten Mechaniker König in Paris.

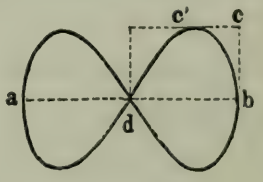
her. Ich halte es an und ziehe es in einer Richtung zur Seite, welche senkrecht zu der früheren ist; jetzt kann nur noch eine Länge von 2,10 m oscilliren, und nach den Gesetzen der Pendelschwingungen bewegt sich ein 2 m langes Pendel mit der doppelten Geschwindigkeit eines 8 m langen Pendels.

Fig. 190.



Um Ihnen die Figur zu zeigen, welche durch die Verbindung dieser beiden Schwingungsperioden entsteht, habe ich an der Kupferkugel q (Fig. 190) einen Haarpinsel befestigt, der leicht über eine auf schwarzem Papier liegende, mit Streusand bedeckte Glasplatte hinstreicht. Wenn ich das Pendel in seiner ganzen Länge schwingen lasse, wird der Sand längs einer geraden Linie, welche die Schwingungsweite anzeigt, weggefegt. Nehmen wir an, ab (Fig. 191) sei diese Linie und sei innerhalb einer Secunde beschrieben worden, wie wir früher schon voraussetzten. Wenn das Pendel an der Grenze seiner Schwingung bei b angelangt ist, so soll ihm ein rechtwinkliger Stoss mitgetheilt werden, der hinreicht, um es in einer Viertelsecunde nach c zu treiben. Wäre dieses

Fig. 191.



der einzige Anstoss, welcher auf das Pendel einwirkt, so würde die Kugel in einer halben Secunde nach *c* gehen und zu *b* zurückkehren. Allein unter den gegenwärtigen Verhältnissen wird es ausserdem noch nach *d* getrieben, welchen Punkt es durch die Schwingung des ganzen Pendels auch in einer halben Secunde erreichen müsste. Beide Schwingungen verursachen demnach, dass die Kugel in demselben Moment nach *d* kommt, und um dies zu thun, muss sie die Curve *d c' b* beschreiben. Ebenso wird während der Zeit, welche das lange Pendel bedarf, um von *d* nach *a* zu kommen, das kurze Pendel über die Hälfte seines Weges hin und her gehen. Beide Schwingungen müssen deshalb *a* in demselben Moment erreichen, und um dies zu vollführen, beschreibt das Pendel die untere Curve zwischen *d* und *a*. Es ist klar, dass diese beiden Curven sich an den entgegengesetzten Seiten von *a* und *b* wiederholen werden, und dass die Verbindung beider Schwingungen schliesslich diese Achterfigur hervorbringen wird, welche Sie jetzt auf dem Sande vor sich sehen.

Dieselbe Figur wird erlangt, wenn der rechtwinklige Anstoss erfolgt, während das Pendel durch seinen Ruhepunkt *d* kommt.

Ich habe hier angenommen, die Zeit, welche das Pendel bedarf, um die Linie *a b* zu beschreiben, sei eine Secunde. Lassen Sie uns nun annehmen, drei Viertel der Secunde seien vorüber und das Pendel sei bei *d'* (Fig. 192, a. f. S.) auf seinem Wege nach *b* angelangt; lassen Sie ihm jetzt den rechtwinkligen Stoss ertheilen, der es in einer Viertelsecunde nach *c* treiben soll. Nun verlangt das lange Pendel, dass es sich von *d'* nach *b* in einer Viertelsecunde bewege; beiden Anstössen ist also Genüge geschehen, wenn das Pendel am Schlusse

der Viertelsecunde bei c' angelangt ist. Um diesen Punkt zu erreichen, muss es die Curve $d'c'$ beschreiben. Es wird offenbar längs derselben Curve wieder zurückkehren und sich am Schluss der nächsten Viertelsecunde wieder bei d' befinden. Von d' nach d braucht das lange Pendel eine Viertelsecunde. Allein am Schlusse dieser Zeit wird sich das kurze Pendel an seiner unteren Schwingungsgrenze befinden; beiden Anforderungen wird dadurch genügt, dass das Pendel sich bei e befindet. Auf diese Weise erlangen wir den Arm $c'e$ einer Curve, welche sich links von e wiederholt, so dass die ganze Curve, welche aus der Verbindung beider Schwingungen entsteht, die in Fig. 192 dargestellte ist. Diese Figur

Fig. 192.

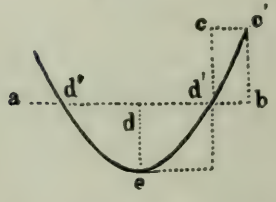
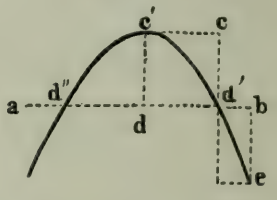


Fig. 193.



wird in der Geometrie Parabel genannt, während die vorhin beschriebene Achterfigur eine Lemniscate genannt wird.

Wir haben hier angenommen, dass die Bewegung des Pendels im Augenblicke, wo ihm der rechtwinklige Anstoss mitgetheilt wurde, in der Richtung nach b gewesen sei. Hätte sie in der Richtung nach a stattgefunden, so wäre die Parabel umgekehrt gewesen, wie dies in Fig. 193 gezeichnet ist. Wenn wir schliesslich annehmen, der Stoss würde nicht dann mitgetheilt, wenn das Pendel durch seinen Gleichgewichtspunkt oder durch einen Punkt geht, welcher ein Viertel oder drei Viertel seines Weges beträgt, sondern an irgend einem anderen Punkte der Linie ab zwischen Ende und Centrum der-

selben, so würden wir unter solchen Umständen weder die Parabel noch die vollkommen symmetrische Figur eines Achters, sondern einen verzerrten Achter erhalten.

Nun sind wir vorbereitet, um den vereinigten Schwingungen unserer beiden Stimmgabeln, wovon eine die Octave der anderen giebt, mit Vortheil folgen zu können. Ich lasse die senkrechte Gabel *T* (Fig. 187) ruhig vor der Lampe stehen und bringe ihr eine horizontale Gabel, welche mit der doppelten Geschwindigkeit vibrirt, gegenüber. Mit dem ersten Bogenstrich über die beiden Gabeln enthüllt sich Ihnen die genaue Aehnlichkeit dieser Verbindung mit unserem Pendel. Eine sehr vollkommene Achterfigur wird jetzt auf dem Schirme beschrieben. Vor unserer Vorlesung stellte ich das Schwingungsverhältniss der beiden Gabeln so genau als möglich gleich 1 : 2 fest; und die Gleichmässigkeit der Figur auf dem Schirme zeigt die vollkommene Stimmung an. Ich halte beide Gabeln an und errege sie von Neuem. Jetzt haben Sie den verzerrten Achter auf dem Schirme. Nach einigen Versuchen kommt die Parabel zum Vorschein. Bei jedem dieser Versuche bleibt die Figur auf dem Schirme unverändert; allein jetzt befestige ich ein Stückchen Wachs auf der einen Stimmgabel. Die Figur ist jetzt nicht mehr dauernd dieselbe, sondern geht vom vollkommenen Achter in einen verzerrten und von da in die Parabel über, woraus sie sich nachher wieder zum Achter öffnet. Indem ich die Stimmung noch abweichender mache, kann ich diese Veränderungen beliebig rasch eintreten lassen.

Unsere nächste Combination besteht aus zwei Gabeln, deren Schwingungsverhältniss gleich 2 : 3 ist. Bemerken Sie zuerst die wundervolle Beständigkeit der Figur, welche durch die Vereinigung dieser beiden Schwingungs-

perioden gebildet wird. Ich klebe nun eine Kupfermünze mit Wachs auf die eine Gabel; die Beständigkeit hört auf, und die leuchtende Figur scheint hin und her zu schwanken. Geht man zu den Intervallen 3 : 4, 4 : 5 und 5 : 6 über, so werden die Figuren immer verwickelter. Die letzte Verbindung 5 : 6 ist so verwirrt, dass man einen sehr schmalen Lichtstreifen anwenden muss, um sie deutlich zu erkennen. Auch die grosse Entfernung zwischen Gabel und Schirm hilft uns die Verwickelung zu entwirren.

Wenn die Figur ganz ausgebildet ist, so drückt die Anzahl der Gipfelpunkte längs der senkrechten und wagerechten Seiten der Figur das Verhältniss der vereinigten Schwingungen aus. Bei der Octave zum Beispiel haben wir zwei Schleifen in einer Richtung und eine in der anderen; bei der Quinte zwei Schleifen in einer und drei in der anderen Richtung. Wenn die Töne sich wie 1 : 3 verhalten, so verhalten sich die leuchtenden Schleifen auch wie 1 : 3. Die Veränderungen, welche mit einzelnen dieser Figuren vorgehen, wenn die Stimmung nicht vollkommen, oder wenn die eine Gabel belastet ist, sind sehr merkwürdig. Bei dem letzten Falle von 1 : 3 zum Beispiel ist es schwer, sich von der Vorstellung frei zu machen, dass man ein festes Gefüge von weissglühendem Metall vor sich habe. Die Plastik der Figur scheint unvereinbar damit, dass sie auf einer ebenen Fläche gezeichnet ist.

Fig. 194.

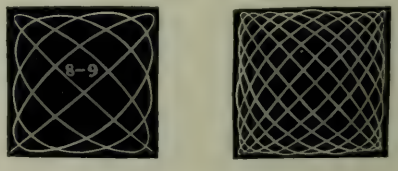
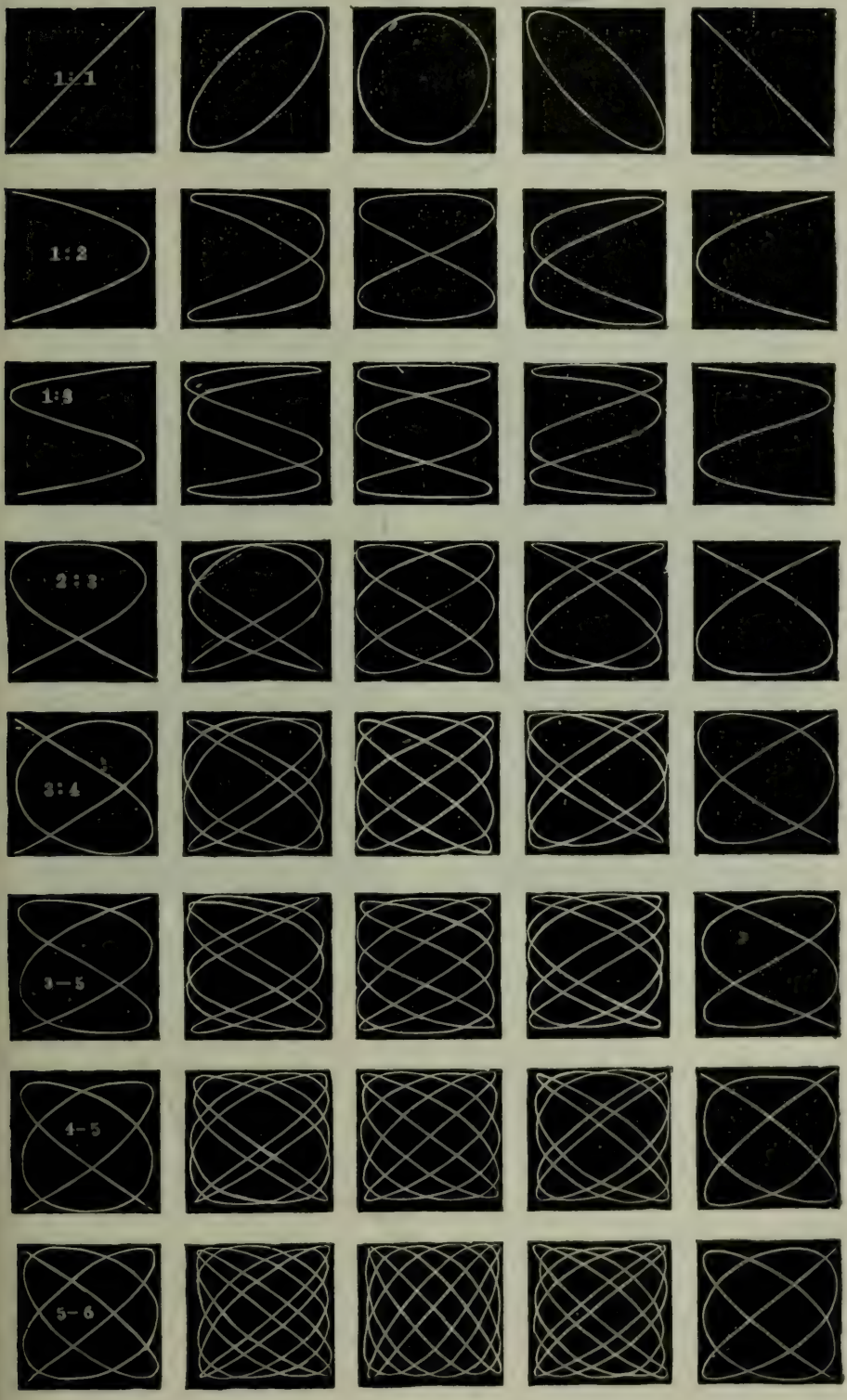


Fig. 195 ist ein Diagramm dieser schönen Figuren, welches Verbindungen von 1 : 1 bis 5 : 6 umfasst. In jedem einzelnen Falle sind die charakteristischen

Fig. 195.

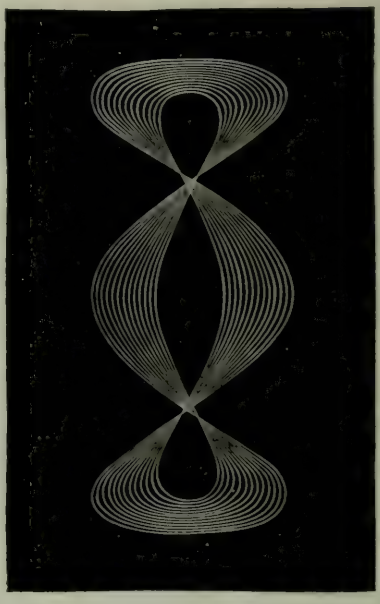


Phasen der Schwingungen dargestellt, welche jede einzelne Figur durchläuft, wenn das Intervall zwischen den beiden Gabeln nicht ganz rein ist. Ich füge hier (Fig. 194 a. S. 504) noch zwei Tafeln hinzu, welche die Verbindung 8 : 9 zeigen.

Diesen Abbildungen rechtwinkliger Schwingungen folgen noch zwei andere (Fig. 196 und 197) aus einer

Fig. 196.

Fig. 197.



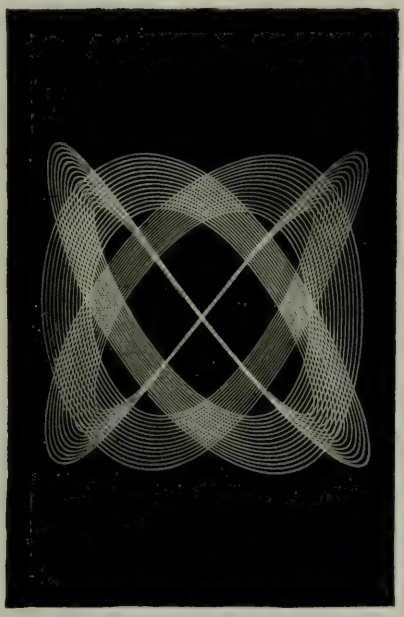
sehr schönen Reihe, die Herr Hubert Airy mit einem conischen Pendel erzielt hat. Die Versuche sind in der „Nature“ vom 17. August und 7. September 1871 beschrieben. Wie aus ihren Schleifen hervorgeht, sind es die Figuren einer Octave und Duodecime.

Aber den lehrreichsten Apparat für die Zusammensetzung rechtwinkliger Schwingungen hat Herr Tisley construirt. Fig. 198 und 199 sind Nachbildungen von Figuren, die er durch die Verbindung von zwei verschiedenen Pendeln erhalten hat; die Schwingungs-

zahlen, welche diesen beiden Figuren entsprechen, sind wie 2 : 3 und 3 : 4. Der Stift, der die Figuren aufzeichnet, wird gleichzeitig von zwei Stäben bewegt, die mit den Pendeln über ihrem Befestigungspunkte verbunden sind. Diese beiden Stäbe befinden sich in den beiden Schwingungsebenen, rechtwinklig zu den Pendeln

Fig. 198.

Fig. 199.

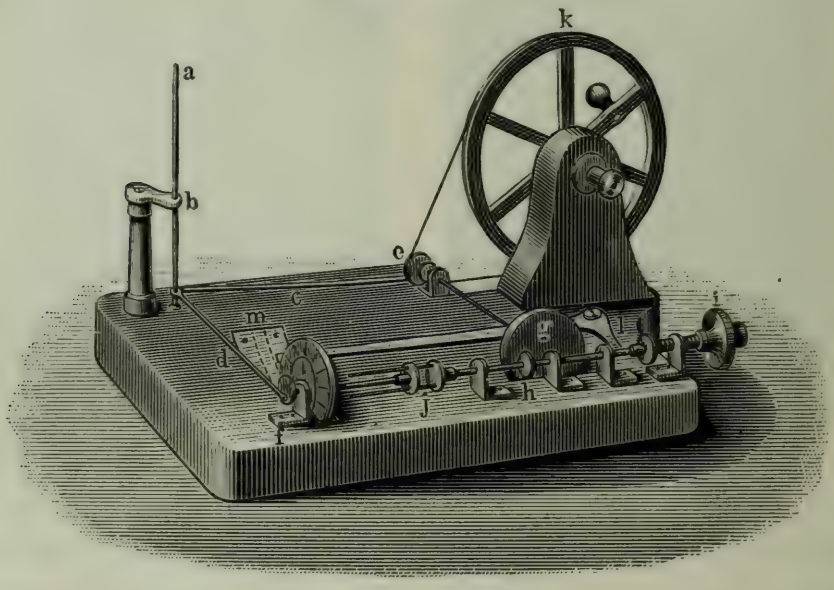


und zu einander. An der Stelle, wo sie sich schneiden, sitzt der Stift. Mittelst eines Kugelgelenkes von besonderer Art können sich die Stäbe mit einem Minimum von Reibung nach allen Richtungen bewegen, während die Schwingungsperioden durch Verschiebung beweglicher Gewichte verändert werden können. Die Figuren werden mit Tinte auf Papier, oder wenn Projection auf einen Schirm erwünscht ist, mit einer scharfen Spitze auf berusstes Glas gezeichnet. Wenn die Pendel, nachdem sie die ganze Figur beschrieben haben, an ihren Ausgangspunkt zurückkehren, haben sie etwas an Amplitude ver-

loren. Die zweite Excursion wird daher kleiner ausfallen als die erste und die dritte kleiner als die zweite. So entsteht jene Serie feiner, immer engere Räume umschreibender Linien, die man auf diesen überaus schönen Figuren sieht. Der Tisley'sche Apparat macht seinem tüchtigen Erbauer alle Ehre[1]).

Sir Charles Wheatstone hat vor vielen Jahren einen kleinen, sehr zweckmässigen Apparat erdacht, um rechtwinklige Schwingungen zu combiniren. Eine Zeichnung (Fig. 200) und eine Beschreibung dieses schönen

Fig. 200.



kleinen Instrumentes, die ich beide seinem berühmten Erfinder verdanke, mögen hier Platz finden. *a* ist ein Stahlstab, der an seinem oberen Ende polirt ist, so dass er einen Lichtpunkt reflectirt; dieser Stab bewegt sich bei *b* in einem Kugelgelenk, so dass er jede Lage an-

[1]) Einige sehr schöne Figuren dieser Art verdanke ich Herrn Lynam, Professor am Yale College.

nehmen kann. Sein unteres Ende ist mit zwei Armen *c* und *d* verbunden, die rechtwinklig zu einander sind und deren andere Enden mit den Peripherien zweier kreisförmiger Scheiben in Verbindung stehen. Die Axe der Scheibe *e* trägt am entgegengesetzten Ende eine zweite grössere Scheibe *g*, welche die kleine Scheibe *h* in Bewegung setzt; *h* sitzt auf der Axe, welche die Scheibe *f* trägt; je nachdem sich diese kleine Scheibe *h* der Mitte der Scheibe *g* nähert oder von ihr entfernt wird, ertheilt sie der Scheibe *f* eine verschiedene relative Geschwindigkeit. Die Stellschraube *i* kann die Scheibe *h* in jede beliebige Lage zwischen der Mitte und dem Rand der grösseren Scheibe *g* bringen; durch die Kuppelung *j* wird die Scheibe *f* in Drehung versetzt, welche Lage sie auch haben mag. Mittelst dieser Anordnung kann, während das Rad *k* gleichmässig gedreht wird, der Stab *a* von der Scheibe *e* in einer Richtung hin und her bewegt werden, während er durch die Scheibe *f* in eine relativ beliebig rasche schwingende Bewegung rechtwinklig zur ersten versetzt wird. So muss das Ende des Stabes alle die schönen akustischen Figuren beschreiben und optisch veranschaulichen, die entstehen, wenn man rechtwinklig zu einander verlaufende Schwingungen verschiedener Perioden combinirt. Ein Hebel *l*, der sich gegen die Mutter *i* stützt, bezeichnet auf der Scala *j* das Verhältniss der beiden Schwingungszahlen[1]).

Ich schliesse diese Bemerkungen über die Zusammensetzung rechtwinkliger Schwingungen mit einem kurzen Hinweis auf einen Apparat, der von Herrn

---

[1]) Herr Sang aus Edinburgh war meines Wissens der Erste, der diesen Gegenstand analytisch behandelte.

A. E. Donkin aus Oxford construirt und in den Verhandlungen der Royal Society, 22. Bd., S. 196, beschrieben ist. Seine Construction vereinigt mechanischen Scharfsinn mit höchstem Geschick. Ehe der Apparat die Hand seines Erfinders verliess, sah ich ihn als hölzernes Modell, und war von seinen Leistungen entzückt. Er wird jetzt von den Herren Tisley und Spiller gebaut.

Uebersicht der neunten Vorlesung.

Pythagoras bestimmte durch Theilung einer Saite die consonanten Intervalle in der Musik und wies nach, dass die Harmonie der von beiden Theilen einer Saite ausgesandten Töne um so vollkommener ist, je einfacher das Verhältniss der beiden Theile der Saite ist. Spätere Forscher zeigten, dass die Saiten sich so verhalten in Folge des Verhältnisses ihrer Länge zu ihrer Schwingungszahl.

Die Doppelsirene veranschaulicht dieses Gesetz der Consonanz. Die vollkommenste Harmonie ist der Einklang, bei dem das Schwingungsverhältniss wie 1 : 1 ist. Dann kommt die Octave mit einem Schwingungsverhältniss von 1 : 2. Hierauf folgen nach einander die Quinte mit einem Verhältniss von 2 : 3; die Quarte mit einem Verhältniss von 3 : 4; die grosse Terz mit einem Verhältniss von 4 : 5; die kleine Terz mit einem Verhältniss von 5 : 6. Das Intervall von einem Ton, mit einem Verhältniss von 8 : 9, ist eine Dissonanz; das eines halben Tones, mit einem Verhältniss von 15 : 16, ist eine rauhe, schneidende Dissonanz.

Das musikalische Intervall ist unabhängig von der absoluten Schwingungszahl der beiden Töne; es hängt nur ab von dem Verhältniss der beiden Schwingungszahlen.

Die Pythagoräer schrieben den Wohlklang der consonanten Intervalle der Zahl und Harmonie zu und brachten sie mit der Sphärenmusik in Verbindung. Euler erklärte das consonante Intervall aus der Beschaffenheit des menschlichen Gemüthes, das nach seiner Aussage an einfachen

Zahlenverhältnissen Gefallen findet. Der Geist liebt die Ordnung, aber nur solche Ordnung, die er mühelos auffassen und übersehen kann. Dieses Vergnügen gewähren in der Musik die einfachen Schwingungsverhältnisse.

Die Untersuchungen von Helmholtz beweisen, dass die schnelle Aufeinanderfolge von Schwebungen oder Schlägen die eigentliche Ursache der Dissonanz ist.

Mittelst zweier singenden Flammen, von denen die eine mit einer verstellbaren Röhre versehen ist, so dass ihre Tonhöhe beliebig verändert werden kann, erzeugt man Schwebungen von jeder gewünschten Geschwindigkeit. Man beginnt mit Schwebungen, die noch gezählt werden können, und steigert ihre Geschwindigkeit allmählich, ohne ihre Continuität zu unterbrechen, bis eine ausgesprochene Dissonanz entsteht.

Aber um diese Theorie ganz zu erfassen, müssen wir den Bau des menschlichen Ohres kennen lernen. Wir haben zunächst das Trommelfell, welches die Ohrtrommel gegen den äusseren Gehörgang abschliesst. Quer über die Trommel zieht sich eine Reihe kleiner Knochen, der Hammer, Amboss und Steigbügel; letzterer stösst gegen eine zweite Membran, welche die Trommel nach innen begrenzt. Hinter dieser Membran liegt das Labyrinth, das mit Wasser angefüllt ist und dessen häutige Wände mit Gehörnerven bedeckt sind.

Jeder Stoss, den das Trommelfell empfängt, wird durch die Reihe von Knöchelchen der gegenüberliegenden Membran, von dieser dem Wasser des Labyrinths und endlich den Gehörnerven mitgetheilt.

Die Uebertragung geschieht nicht direct. Die Schwingungen werden zunächst von gewissen Körpern aufgenommen, die im Stande sind, mitzuschwingen. Es giebt drei Arten solcher Körper: die Gehörsteine, welche kleine krystallinische Theilchen sind, die Hörhärchen von Max Schultze und die Corti'schen Fasern. Die letzteren sind in jeder Beziehung ein Saiteninstrument von ausserordentlicher Complicirtheit und Vollkommenheit, das sich im Ohre befindet.

Wahrscheinlich spielt das Corti'sche Organ in Bezug auf unseren Gegenstand eine besonders wichtige Rolle. Damit eine Saite bis zu einem gewissen Grade auf die andere reagirt, braucht der Einklang nicht vollkommen zu sein; eine gewisse Reaction tritt schon in unmittelbarer Nähe des Einklanges ein.

Daher bringen zwei Saiten, deren Tonhöhen nicht zu stark von einander abweichen, eine dritte Saite, deren Tonhöhe zwischen beiden liegt, zum Mitschwingen. Und wenn beide Saiten gleichzeitig ertönen, werden ihre Schwebungen der dritten Saite mitgetheilt.

Ebenso verhält es sich mit dem Corti'schen Organ. Wenn einfache Töne von verschiedener Höhe, oder vielmehr wenn Schwingungen von verschiedener Geschwindigkeit dessen Fasern berühren, so wird diejenige Faser erregt, deren Schwingungsperiode mit ihnen übereinstimmt. Und wenn zwei nahe zusammen liegende Töne Schwebungen erzeugen, so wird die dazwischen liegende Corti'sche Faser von beiden zugleich erregt und nimmt die Schwebungen auf.

In der mittleren und oberen Lage der Tonleiter, wo die Schwebungen mit einer Geschwindigkeit von 33 in der Secunde auf einander folgen, sind sie am schärfsten und schneidendsten. Bei einer Geschwindigkeit von 132 hören sie auf, vernehmbar zu sein.

Die vollkommene Consonanz gewisser musikalischer Intervalle beruht darauf, dass keine Schwebungen vorhanden sind. Die unvollkommene Consonanz anderer Intervalle beruht darauf, dass sie vorhanden sind. Hier spielen die Obertöne eine wichtige Rolle. Denn, wenn auch die Grundtöne ohne merkliche Rauhigkeit zusammen klingen, können die Obertöne sich so zu einander verhalten, dass sie scharfe, schneidende Schwebungen hervorbringen. Genaue Untersuchungen ergeben, dass Intervalle, die sich nur durch hohe Zahlen ausdrücken lassen, stets von Obertönen begleitet sind, welche Schwebungen hervorbringen, während bei Intervallen, die sich durch niedrige Zahlen ausdrücken lassen, so gut wie keine Schwebungen vorhanden sind.

Die graphische Darstellung der Consonanzen und Dissonanzen der Tonleiter von Helmholtz liefert einen schlagenden Beweis für diese Erklärung.

Lissajous stellt durch ein sehr schönes Verfahren die musikalischen Intervalle optisch dar. Jedem Intervall entspricht eine bestimmte Figur, welche durch die Vereinigung seiner Schwingungen entsteht.

Die Zusammensetzung von Schwingungen ist in neuerer Zeit sehr schön veranschaulicht worden durch die Apparate von Sir C. Wheatstone, Herrn Herbert Airy und Herrn A. E. Donkin, sowie durch den schönen Pendelapparat von Herrn Tisley.

Anhang.

I.

Ueber die Einwirkung musikalischer Töne auf die Flamme eines Leuchtgasstrahls.

Von John Leconte. M. D.[1]).

Bald nachdem ich Professor John Tyndall's ausgezeichnete Abhandlung: „Ueber Töne, welche durch Verbrennung von Gasen in Röhren erzeugt werden“ [2]) gelesen hatte, befand ich mich in einer Privatgesellschaft von acht Personen, die sich des Abends versammelt hatte, um Musik zu hören. Es wurden einige Trios von Beethoven auf Clavier, Geige und Cello ausgeführt. An der Backsteinwand in der Nähe des Claviers waren zwei Fischschwanzbrenner angebracht. Beide Flammen brannten stetig, bei geschlossenen Fenstern und ruhiger Luft. Die eine befand sich jedoch offenbar unter einem Druck, der sie beinahe zum Flackern brachte.

[1]) Diese vortreffliche Arbeit war der Ausgangspunkt für die Versuche über empfindliche Flammen, die in der dritten und vierten Vorlesung angeführt sind, während die Untersuchungen von Thomas Young und Savart den Ausgangspunkt für meine Versuche über Rauch- und Wasserstrahlen bildeten. — J. T.

[2]) Phil. Mag. S. 4, vol. XIII, p. 473, 1857.

Kurz nach Beginn der Musik bemerkte ich, dass die Flamme Schwingungen zeigte, die mit den hörbaren Schwebungen der Musik vollkommen übereinstimmten. Diese Erscheinung musste Jedem auffallen, namentlich wenn die starken Töne des Cellos hinzutraten. Es war ausserordentlich interessant zu beobachten, wie vollständig genau sogar die Triller dieses Instrumentes von der Flamme wiedergegeben wurden. Für einen Tauben wäre die Harmonie sichtbar geworden. Im Laufe des Abends, als der Gasverbrauch in der Stadt abnahm und dadurch der Druck gesteigert wurde, ward die Erscheinung noch deutlicher. Das Hüpfen der Flamme steigerte sich allmählich, wurde etwas unregelmässig und ging endlich in ein anhaltendes Flackern über, wobei der charakteristische Ton gehört wurde, der anzeigt, dass mehr Gas ausströmt, als verbrannt werden kann. Ich stellte durch einen Versuch fest, dass die Erscheinung nur dann eintrat, wenn das Ausströmen des Gases so geregelt war, dass die Flamme dem Flackern nahe kam. Ich überzeugte mich ferner durch den Versuch, dass die Wirkungen sich nicht zeigten, wenn man den Boden und die Wände des Zimmers durch wiederholte Stösse erschütterte. Daraus geht hervor, dass die Schwankungen der Flamme nicht von indirecten Schwingungen herrührten, die durch das Mittel der Wände dem Brenner mitgetheilt sein mochten, sondern dass sie durch den directen Einfluss der Tonwellen der Luft auf die Flamme erzeugt waren.

Bei den Versuchen von Schaffgotsch und Tyndall ist offenbar das „Zittern der singenden Flamme in der Glasröhre", das durch die Stimme oder Sirene erzeugt wird, vollkommen analog dem Vorgange, der sich ohne Mitwirkung einer Röhre vor meinen Augen vollzog. Bei dem von mir beobachteten Fall war das Gas so regulirt, dass die Flamme im Begriff stand zu flackern, oder einen „singenden Ton" von sich zu geben. Unter diesen Umständen genügten regelmässig wiederkehrende, starke Luftwellen, um übereinstimmende Schwingungen bei der Flamme hervorzurufen.

Wäre das Instrument beinahe im Einklang gewesen mit dem Ton, den die Flamme von sich giebt, wenn der Druck so verstärkt wird, dass sie ins Flackern geräth, so würde die Wirkung noch auffallender gewesen sein. Dieser Punkt wäre durch den Versuch zu prüfen.

Bei Tyndall's Versuchen mit dem in einer Röhre brennenden Gasstrahl konnte die „schweigende" Flamme weder durch Händeklatschen, noch durch Rufen etc. in eine „singende" verwandelt werden. Ebenso blieben auch in meinem Falle unregelmässige Geräusche ohne wahrnehmbaren Einfluss. Es scheint, dass die Impulse sich addiren müssen, um eine merkliche Wirkung auszuüben.

In Bezug auf die Art, wie Töne durch die Verbrennung von Gasen in Röhren erzeugt werden, gilt Faraday's Erklärung für im Wesentlichen zutreffend. Bekanntlich schreibt er diese Töne der Reihe von Explosionen zu, welche durch die periodische Verbindung des Sauerstoffes der Luft mit dem Gasstrahl entstehen. Beim Durchlesen der schönen Arbeit von J. Plateau über: „Die Theorie der Veränderungen, welchen Flüssigkeitsstrahlen aus kreisförmigen Oeffnungen ausströmen, unter der Einwirkung von Schwingungsbewegungen unterworfen sind" [1]), fiel mir plötzlich ein, dass die Erscheinung, die ich zufällig wahrgenommen hatte, nur ein besonderer Fall derjenigen Wirkung sei, welche der Schall überhaupt auf alle Arten flüssiger Strahlen ausübt. Weitere Ueberlegung diente nur dazu, den ersten Eindruck zu befestigen.

Die schönen Untersuchungen von Felix Savart über die Einwirkung des Schalles auf Wasserstrahlen ergaben so viele Analogien mit der Einwirkung des Schalles auf brennende Gasstrahlen, dass es nahe liegt, zu fragen, ob nicht beide eine gemeinsame Ursache haben. Um diese Frage in das rechte Licht zu setzen, lasse ich einige Resultate der

---

[1]) Theory of the Modifications experienced by Jets of Liquid issuing from Circular Orifices when exposed to the Influence of Vibratory Motions. Phil. Mag. S. 4, vol. XIV, p. 1 et sequ. Juli 1857.

Savart'schen Versuche folgen. Senkrecht herabströmende Wasserstrahlen, die der Einwirkung von Schwingungsbewegungen ausgesetzt sind, unterliegen folgenden Modificationen:

1. Der continuirliche Theil wird verkürzt; das Zerfallen des Strahls in einzelne Tropfen findet näher an der Ausflussstelle statt, als wenn er nicht unter der Einwirkung von Schwingungen steht.

2. Alle Tropfen werden, indem sie sich von dem Ende des continuirlichen Theiles ablösen, abwechselnd in senkrechter und horizontaler Richtung abgeplattet, und erscheinen unter dem Einfluss ihrer translatorischen Bewegung als regelmässig angeordnete Serien maximaler und minimaler Dicke oder als Schwingungsbäuche und Knoten.

3. Die obigen Modificationen sind ausgeprägter und regelmässiger, wenn in der Nähe derjenige Ton angegeben wird, der durch den Aufprall des discontinuirlichen Theiles auf eine ausgespannte Membran entstehen würde. Der continuirliche Theil wird bedeutend verkürzt und die Schwingungsbäuche schwellen an.

4. Wenn der äussere Ton beinahe im Einklang ist, wird der continuirliche Ton abwechselnd länger und kürzer, und die Schwebungen, die mit diesen Veränderungen übereinstimmen, sind dem Ohr vernehmbar.

Wenn ein Strahl in schräger Richtung ausgesandt wird, so dass sich der continuirliche Theil zu einer Art von Garbe in derselben senkrechten Ebene zerstreut, bemerkt Savart folgende Erscheinungen:

a) Unter der Einwirkung von Schwingungen einer bestimmten Periode bildet diese Garbe zwei gesonderte Strahlen, von denen jeder einzelne regelmässig angeordnete Schwingungsbäuche und Knoten hat; unter Umständen kann die Garbe auch drei Strahlen bilden.

b) Der Ton, der den continuirlichen Theil am stärksten verkürzt, sammelt stets das Ganze in einen einzigen Strahl mit einem vollkommen regelmässigen System von Schwingungsbäuchen und Knoten.

Ein letzter Bericht von Savart, der erst nach seinem Tode durch Arago im Jahre 1853 der Pariser Akademie der Wissenschaften vorgelegt wurde[1]), enthält einige merkwürdige Beobachtungen über die Entstehung musikalischer Töne durch das Ausströmen von Flüssigkeiten aus kurzen Röhren. Unter gewissen Vorbedingungen (die genau angegeben sind) erzeugt das Ausströmen der Flüssigkeit eine Reihe musikalischer Töne von grosser Intensität und eigenthümlicher Aehnlichkeit mit der menschlichen Stimme. Dass diese Töne nicht durch die herabfallenden Tropfen des Strahles hervorgebracht werden, zeigt sich, wenn man die Hahnöffnung unter Wasser bringt. Unter diesen Umständen muss der Strahl continuirlich abfliessen, und die Töne entstehen nach wie vor. Dieses unerwartete Resultat ist durch neuere Versuche von Tyndall vollkommen bestätigt worden[2]).

Nach den Untersuchungen von Plateau sind alle Erscheinungen, die mit der Einwirkung von Schwingungen auf Flüssigkeitsstrahlen zusammenhängen, herzuleiten aus dem Conflict zwischen den Schwingungen und den sogenannten „formbildenden Kräften“ („forces figuratrices“). Die physikalische — und wie es scheint unbestreitbare — Thatsache zugegeben, dass ein flüssiger Cylinder eine Stabilitätsgrenze erreicht, wenn sich seine Länge zu seinem Durchmesser verhält wie 22 : 7, ist es beinahe eine physikalische Nothwendigkeit, dass der Strahl so beschaffen sei, wie Savart's Beobachtungen lehren. Es ist gleichfalls höchst wahrscheinlich, dass der Flüssigkeitsstrahl während des Uebergangsstadiums in discontinuirliche Tropfen ausserordentlich empfindlich gegen die Einwirkung jeder Art von Schwingungen sein wird. Jedoch muss eingestanden werden, dass Plateau's schöne und zusammenhängende Theorie den letzten Versuch von Savart nicht mit einschliesst, bei dem

---

[1]) Comptes Rendus, Aug. 1853. Ebenfalls Phil. Mag. 14, Band VII, p. 186, 1854.

[2]) Phil. Mag. S. 4, Band VIII, p. 74, 1854.

musikalische Töne durch einen Wasserstrahl erzeugt werden, der unter der Oberfläche derselben Flüssigkeit ausströmt. Es ist schwer, sich vorzustellen, welchen Antheil die „formbildenden Kräfte“ unter diesen Umständen an der Erscheinung haben können. Dieser merkwürdige Versuch scheint vielmehr Savart's ursprüngliche Idee zu bestätigen, dass die Schwingungen, welche den Ton erzeugen, in dem Glasgefäss selbst stattfinden, und dass die Ursache in der Erscheinung des Fliessens zu suchen ist.

Wollen wir die Principien der Plateau'schen Theorie auf Gasstrahlen anwenden, so müssen wir die Vorstellung aufgeben, dass in Gasen keine Molekularcohäsion vorhanden ist. Aber giebt es nicht zahlreiche Beweise für das Vorhandensein einer Cohäsion zwischen den Theilchen einer Gasmasse? Beweist nicht die Abweichung von der strengen Regel sowohl bei dem Mariotte'schen wie bei dem Gay-Lussac'schen Gesetze — besonders bei condensirbaren Gasen, wie aus den bewundernswürdigen Versuchen von Regnault hervorgeht — dass die Hypothese von der Nichtexistenz der Cohäsion in gasförmigen Körpern irrthümlich ist? Verrathen nicht die sich ausdehnenden Ringe, welche aufsteigen, wenn eine Blase von Phosphorwasserstoff sich in der Luft entzündet, das Vorhandensein irgend einer Cohäsionskraft in gasförmigen Verbrennungsproducten (Wasserdampf), deren Umrisse durch die undurchsichtige Phosphorsäure sichtbar werden? Mit einem Wort, demonstrirt nicht schon die Form der Flamme eines Fischschwanzbrenners, dass zwischen den Theilchen des ausströmenden Gases Cohäsion vorhanden sein muss? Bekanntlich besteht bei diesem Brenner der einzelne Strahl aus zwei schrägen Strahlen, die sich unmittelbar vor dem Ausströmen des Gases vereinigen. Auf diese Weise entsteht eine senkrechte Flammenfläche. Wie könnte das Zusammenwirken zweier Gasstrahlen diese Wirkung hervorbringen, wenn nicht die Cohäsionskraft dabei betheiligt wäre? Ist es nicht klar, dass eine solche fächerförmige Flamme durch dieselben Ursachen hervorgebracht werden

muss, wie jene schönen vielgestaltigen Wasserflächen, die bei den glänzenden Versuchen von Savart und Magnus durch das Zusammenwirken zweier Wasserstrahlen erzeugt wurden?

Zugegeben, dass Gase Molekularcohäsion besitzen, so scheint es physikalisch gewiss, dass Gasstrahlen denselben Gesetzen unterliegen, wie Flüssigkeitsstrahlen. Schwingungsbewegungen, die in ihrer Nähe erregt werden, müssen daher in derselben Weise auf sie einwirken, wie sie nach Savart auf Wasserstrahlen einwirken. Flammen oder glühendes Gas sind Gaskörper in sichtbarer Form, daher vorzüglich geeignet für Untersuchungen durch das Experiment; und wenn sie durch einen Strahl erzeugt werden, muss die Plateau'sche Theorie auf sie angewendet werden können. Nach dieser Theorie entstehen die Schläge oder Schwebungen, welche ich an der Gasflamme unter der Einwirkung musikalischer Töne beobachtete, dadurch, dass die Luftwellen mit den „formbildenden Kräften" (wie Plateau sie bezeichnet) in Conflict gerathen und periodische Schwankungen der Intensität erzeugen, die von den Tonstössen abhängen.

Wenn diese Ansicht zutrifft, müssen wir dann nicht unsere Vorstellung umändern, dass bei der Erzeugung musikalischer Töne durch brennende Gasstrahlen die Röhre betheiligt ist? Müssen wir nicht annehmen, dass alle brennenden Strahlen — wie die Wasserstrahlen — zum Tönen geneigt sind, und dass die Röhre bloss günstige Bedingungen für das Entstehen der Töne herbeiführt? Bekanntlich bringen auch vollkommen freie Flammen häufig einen singenden Ton hervor. Sollte dieser nicht auch durch eine Reihe von Explosionen erzeugt werden, ähnlich wie die Töne, welche in Glasröhren entstehen? Jedenfalls wird, unter dem Einfluss von Molekularkräften, jede Ursache, die dazu beiträgt, die Flamme zu verlängern, ohne das Ausströmen des Gases zu beschleunigen, dahin wirken, die Continuität der Flamme zu unterbrechen und so jene Mischung von Gas und Luft zu erzeugen, die für das Entstehen von Explosionen wesentlich ist. Inwiefern die Röhre zur Her-

beiführung günstiger Bedingungen beiträgt, ist klar. Beweist nicht die „Perlenkette“ mit ihrer Reihe „leuchtender Sterne“, die Tyndall beobachtete, als er mittelst eines beweglichen Spiegels eine Oelgasflamme in einer Röhre untersuchte, dass die Flamme discontinuirlich wurde, genau wie der continuirliche Theil eines Wasserstrahles unter der Einwirkung von Tonwellen verkürzt und in einzelne Tropfen aufgelöst wird? Aber ich versage es mir, auf diesen interessanten Gegenstand näher einzugehen, da der oben genannte ausgezeichnete Physiker weitere Arbeiten darüber in Aussicht gestellt hat. Von einem so scharfsinnigen Gelehrten dürfen wir eine gründliche Untersuchung der Erscheinung in allen ihren Beziehungen erwarten. Inzwischen möchte ich die wissenschaftliche Welt auf die in diesem Aufsatz dargelegte Ansicht aufmerksam machen, insofern sie mehrere Gruppen von Erscheinungen unter einen Gesichtspunkt bringt und als theilweise Verallgemeinerung angesehen werden kann.

Aus Silliman's American Journal, Jan. 1858.

II.

Ueber die Reversibilität des Schalls[1]).

Am 21. und 22. Juni 1822 wurde in Frankreich durch eine vom Bureau des Longitudes eingesetzte Commission eine Reihe von berühmten Versuchen über die Schallgeschwindigkeit ausgeführt. Man hatte zwei Stationen gewählt, eine bei Villejuif, die andere bei Montlhéry. Beide liegen südlich von Paris, 17,7 km von einander entfernt. In Villejuif befanden sich Prony, Mathieu und Arago, in Montlhéry Humboldt, Bouvard und Gay-Lussac als Beobachter. An beiden Stationen wurden Geschütze abgefeuert, die mit zwei und drei Pfund Pulver geladen waren. Aus dem Zeitraum zwischen dem Aufblitzen des Feuers und dem Eintreffen des Schalles wurde die Schallgeschwindigkeit berechnet.

[1]) Proc. der Royal Society, 15. Jan. 1875.

Bei dieser denkwürdigen Gelegenheit fiel es auf, dass, während alle Kanonenschüsse aus Montlhéry in Villejuif vollkommen deutlich gehört wurden, die weitaus grössere Zahl der in Villejuif abgegebenen Schüsse Montlhéry nicht erreichten. Hätte der Wind in der Richtung von Montlhéry nach Villejuif gestanden, so würde man darin die Ursache dieses Unterschiedes gesucht haben; aber die Luft war ruhig, und die geringe vorhandene Luftströmung bewegte sich in der Richtung von Villejuif nach Montlhéry, also entgegen der Richtung, in der man den Schall am besten hörte.

Der Unterschied in der Schallübertragung war so ausgeprägt, dass am 22. Juni, während sämmtliche Schüsse aus Montlhéry in Villejuif „à merveille" gehört wurden, von zwölf in Villejuif abgegebenen Schüssen an der anderen Station nur ein einziger und dieser schwach gehört wurde.

Arago macht in seinem Bericht[1]) keinen Versuch, diese Anomalie zu erklären. Er sagt: „Quant aux différences si remarquables d'intensité, que le bruit du canon a toujours présentées suivant qu'il se propageait du nord au sud entre Villejuif et Montlhéry, ou du sud au nord entre cette seconde station et la première; nous ne chercherons pas aujourd'hui à l'expliquer, parceque nous ne pourrions offrir au lecteur que des conjectures dénuées de preuves" [2]).

Vor einigen Jahren unternahm ich es, den Gegenstand in den Bereich des Versuches zu bringen. Ich stellte zunächst fest, ob die kürzlich von mir in den Philosophical Transactions beschriebene empfindliche Flamme sich dazu eigne, um Versuche über die Reversibilität einer Schallbahn und eines den Schall auffangenden Gegenstandes anzustellen. Die empfindliche Flamme, deren ich mich gewöhnlich bediene, ist 45 bis 65 cm lang, und die Zunge, die als Schallquelle fungirt, hat nicht ganz 0,6 qcm Umfang. Erwies sich nun die ganze Flamme oder die Röhre, die sie speist, für Schallschwingungen empfindlich, so waren genaue Versuche über die Reversibilität von Zunge und

---

[1]) Researches in Chemistry and Physics, p. 484.

[2]) Connaissance des Temps 1825, p. 370.

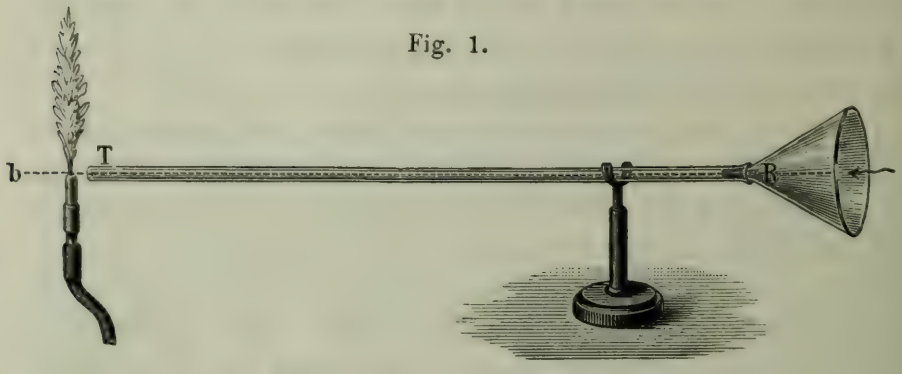
Flamme schwierig, ja unmöglich. Ich musste daher erst zu erfahren suchen, ob der Sitz der Empfindlichkeit derart in der Flamme localisirt sei, dass die beabsichtigte Vertauschung der Flamme und Zunge vorgenommen werden konnte.

Ich stellte die Flamme hinter einen Pappschirm, führte das Rohr eines Trichters durch ein Loch in der Pappe und richtete ihn auf die Mitte der Flamme. Hierauf wurde die schwingende Zunge in den Trichter gebracht. Zunächst brachten die Schallwellen keine merkliche Wirkung hervor. Sobald aber das Rohr des Trichters auf die Wurzel der Flamme gerichtet wurde, trat eine heftige Wirkung ein.

Um die Genauigkeit des Versuches zu erhöhen, verband ich den Trichter mit einer meterlangen Röhre von 1,2 cm Durchmesser. Der Zweck dieser Anordnung war, die Wirkung der vom Rande des Trichterrohres zerstreuten Wellen durch die Entfernung abzuschwächen und nur diejenigen auf die Flamme wirken zu lassen, welche durch die Glasröhre gingen.

Wenn ich das Ende der Röhre an die Brenneröffnung *b* (Fig. 1), oder die Brenneröffnung an das Ende der

Fig. 1.



Röhre brachte, so wurde die Flamme durch die tönende Zunge *R* in lebhafte Bewegung versetzt. Wurde aber der Schall auf den Theil der Flamme etwa 1,2 cm oberhalb der Oeffnung concentrirt, so blieb die Wirkung aus. Auch wenn der Schall auf den Brenner selbst ungefähr 1,2 cm unterhalb dessen Oeffnung concentrirt wurde, trat keine Wirkung ein.

Diese Versuche zeigen, dass der „Sitz der Empfindlichkeit“ localisirt ist, und dass die Flamme als ein geeignetes Instrument für die beabsichtigten Versuche angesehen werden kann.

Die Versuche wurden in folgender Weise ausgeführt: Die empfindliche Flamme wurde hinter einen 45 cm hohen und 30 cm breiten Pappschirm gebracht. Auf der anderen Seite des Schirmes wurde in gleicher Höhe mit der Wurzel der Flamme und in 2 m Entfernung eine schwingende Zunge aufgestellt. Von hier aus versetzte der Schall der Zunge die Flamme in heftige Unruhe.

Bei dieser Anordnung war die ganze obere Hälfte der Flamme von der Zunge aus sichtbar; deshalb war es nöthig gewesen, durch die vorhergehenden Versuche festzustellen, dass der Schall auf den oberen Theil der Flamme keine Wirkung ausübte, und dass die Wellen wirklich um den Rand des Schirmes biegen mussten, um den Sitz der Empfindlichkeit in der Nähe des Brenners zu treffen.

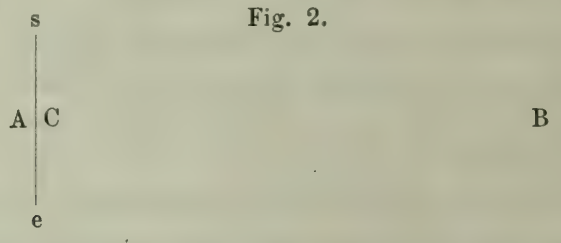
Die Flamme und die Zunge wurden nun vertauscht, so dass die Zunge dicht hinter den Schirm, die Flamme in eine Entfernung von 2 m zu stehen kam. Nunmehr blieb die Wirkung der Schallwellen auf die Flamme aus.

Der Versuch wurde mehrfach wiederholt und verändert. Es wurden Schirme von verschiedener Grösse angewendet, und statt Zunge und Flamme zu vertauschen, wurde der Schirm selbst umgestellt, so dass bei einigen Versuchen die Flamme, bei anderen die Zunge unmittelbar hinter den Schirm zu stehen kam. Auch wurde dafür gesorgt, dass keine von der Wand, der Zimmerdecke oder vom Körper des Beobachters reflectirten Schallwellen die Wirkung beeinträchtigten. Stets zeigte sich, dass die Wirkung eintrat, wenn die Zunge vom Schirm entfernt und die Flamme dicht dahinter war; während sie ausblieb, wenn man die Anordnung umkehrte.

So soll z. B. *se* auf Fig. 2 (a. f. S.) ein senkrechter Durchschnitt des Schirmes sein. Wenn die Zunge bei *A* und die Flamme bei *B* ist, bleibt die Wirkung aus; wenn die Zunge

bei B und die Flamme bei A ist, tritt die Wirkung ein. Es sei hinzugefügt, dass die Schwingungen, welche dem Schirm und von diesem der Luft mitgetheilt werden, unwirksam sind, denn wenn man die Zunge, die bei B wirksam war, nach C rückt, wo sie viel stärker auf den Schirm wirkt, so hört sie auf, die Flamme bei A zu beeinflussen.

Fig. 2.



Jetzt sind wir hinreichend vorbereitet, um uns mit dem Misslingen der Umkehrung in grösserem Maassstabe bei den Versuchen vom Jahre 1822 zu beschäftigen. Glücklicher Weise kommt uns dabei eine höchst wichtige Beobachtung zu Statten. Es wurde zur Zeit bemerkt und gemeldet, dass, während die Kanonenschüsse aus Villejuif ohne Echo verhallten, ein 20 bis 25 Secunden langes Echo jeden Schuss aus Montlhéry begleitete und von den dort befindlichen Beobachtern gehört wurde. Arago, der Verfasser des Berichts, schreibt dieses Echo der Reflexion von den Wolken zu, eine Erklärung, die wir jetzt als zweifelhaft anzusehen berechtigt sind. Der Bericht meldet, dass „tous les coups tirés à Montlhéry y étaient accompagnés d'un roulement semblable à celui du tonnerre“. Ich mache aufmerksam auf das Wort „accompagnés“. Es passt auf unsere Versuche mit Geschützen am South Foreland, bei denen zwischen der Explosion und dem Echo keine merkliche Pause eintrat, aber es kann kaum auf ein Echo angewendet werden, das von den Wolken herrührt. Denn, wenn man die Entfernung der Wolken auch nur auf 1,6 km schätzt, so müsste zwischen der Detonation und dem Echo doch mindestens ein Zeitraum von 10 Secunden verstreichen. Von einer solchen Pause ist nicht die Rede; wäre sie vorhanden gewesen, so hätte Arago jedenfalls nicht „accompagnés“, sondern „suivis“ gesagt. Das Echo scheint

überdies continuirlich gewesen zu sein, während die Wolken einzeln waren. „Ces phénomènes", sagt Arago, „n'ont jamais eu lieu qu'au moment de l'apparition de quelques nuages." Von einzelnen Wolken kann aber schwerlich eine continuirliche Folge von Echos ausgehen. Der Versuch hat gezeigt, dass Wolken, die viel dichter sind als sie jemals in der Atmosphäre vorkommen, den Schall nicht merklich reflectiren. Wolkenlose Luft dagegen, die nach Arago kein Echo giebt, hat sich als sehr stark reflectirend erwiesen. Nehmen wir dies alles zusammen, so haben wir guten Grund, die Hypothese des grossen französischen Gelehrten zu bezweifeln.

Ferner ist in Betracht zu ziehen, dass von den unzähligen Schüssen, die am South Foreland abgegeben wurden und bei denen die Aufmerksamkeit besonders auf das Luftecho gerichtet war, kein einziger ohne einen Widerhall von messbarer Dauer blieb. Also soll Arago's Behauptung, dass bei klarem Wetter in Villejuif kein Echo gehört wurde, wohl einfach bedeuten, dass es sehr schnell verhallte. Wenn die Aufmerksamkeit nicht speciell darauf gerichtet war, konnte eine geringe Verlängerung der Detonation sehr leicht dem Ohr entgehen; um so mehr, wenn das Echo stark und rasch erfolgte, so dass es noch einen Theil der eigentlichen Detonation zu bilden schien.

Es würde mir sehr widerstreben, in diesem Punkt die Grenzen der erlaubten Kritik zu überschreiten oder ohne guten Grund die verbürgten Beobachtungen bedeutender Forscher in Zweifel zu ziehen. Wenn man jedoch zu alledem noch bedenkt, dass Arago und seine Mitarbeiter sich mit einem ganz anderen Problem beschäftigten und das Echo nur ein Nebenumstand, nicht der Gegenstand ihrer Untersuchungen war, so dürfen wir wohl annehmen, dass er eine Detonation als „momentan" bezeichnete, deren Luftecho sich nicht merklich von dem directen Schall unterschied und rasch verhallte.

Wenden wir uns nun zu den Beobachtungen in Montlhéry, so fällt uns die ungewöhnlich lange Dauer der Echos an dieser Station auf. Die am South Foreland abgefeuerten

Ladungen waren ebenso gross wie die grössten französischen; sie erzeugten aber niemals annähernd ein Echo von 20 bis 25 Secunden. Selten brachten sie es auf die Hälfte dieser Zeit. Selbst das Echo der Sirenen, das stärker und anhaltender ist als das der Geschütze, erreichte niemals die Dauer des Echos von Montlhéry. Die nächste Annäherung an dieses fand am 17. October 1873 statt, als das Echo der Sirenen 15 Secunden lang anhielt.

An demselben Tage (dies ist ein Punkt von wesentlicher Bedeutung) erreichte der Schall auch die grösste Ausbreitung; man hörte die Detonationen bei der Boje von Quenocs, $16\,^1/_2$ Seemeilen vom South Foreland. Ich habe an anderer Stelle ausgesprochen, dass die Dauer des Luftechos die „atmosphärische Tiefe“ anzeigt, aus der es herrührt[1]). Ein Beispiel aus der Optik mag zur Erläuterung dienen. Wenn Licht auf ein Stück feste Kreide fällt, so wird das Licht durch die Theilchen an der Oberfläche vollständig zerstreut; zerreibt man aber die Kreide zu Pulver und vermengt sie mit Wasser, so gelangt das reflectirte Licht aus viel grösseren Tiefen der trüben Flüssigkeit zum Auge. Die feste Kreide verhält sich wie sehr dichte akustische Wolken; das Kreidewasser wie Wolken von geringerer Dichtigkeit. Im ersteren Fall ist das Echo kurz, im letzteren lang. Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass die Montlhéry umgebende Atmosphäre bei der erwähnten Gelegenheit ungemein diakustisch gewesen sein muss; während der kurze Widerhall in Villejuif darauf schliessen lässt, dass die Luft an jener Station in hohem Grade akustisch dicht war.

Die Ursache dieser Dichtigkeit möchte ich auf folgende Art erklären. Villejuif liegt dicht bei Paris; und bei dem herrschenden schwachen Winde strich die Stadtluft leise über das Fort hin. Tausende von Schornsteinen entsandten auf der Windseite von Villejuif erwärmte Luftströme, so dass jene Station wahrscheinlich von einer sehr ungleichartigen Atmosphäre umgeben war. In mässiger Höhe über Villejuif

---

[1]) Siehe S. 368.

gelangten die Temperaturunterschiede wieder ins Gleichgewicht. Diese ungleichartige Luft, welche Villejuif umgab, ist bei unserem Versuche durch den Schirm veranschaulicht, hinter dem sich unmittelbar die Schallquelle befindet. Der obere Theil des Schirmes stellt den Theil der Atmosphäre dar, in welchem sich die Temperaturunterschiede wieder ausgeglichen haben. Die Zungenpfeife befindet sich bei unserem Versuche so dicht hinter dem Schirm, dass ihr Echo sich mit dem directen Schall deckt und nicht davon zu unterscheiden ist. Dem entsprechend folgte auch in Villejuif das Echo dem directen Schall so unmittelbar und verhallte so rasch, dass es sich der Wahrnehmung entzog. Unsere empfindliche Flamme wird von der Zungenpfeife nicht afficirt, wenn sich diese dicht hinter dem Pappschirm befindet. Aus demselben Grunde hörten auch die Beobachter in Montlhéry nicht die in Villejuif abgegebenen Schüsse.

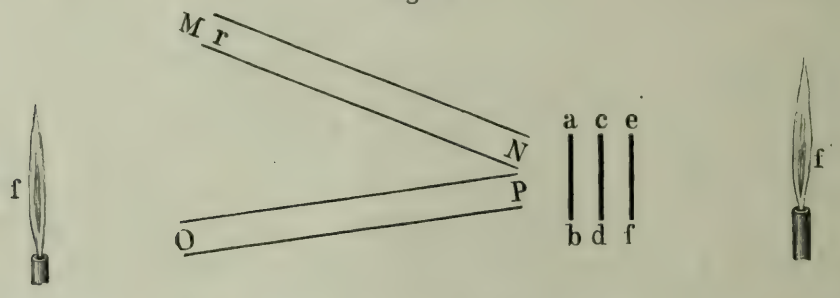
Der Gegenstand lässt sich durch den Versuch noch weiter aufklären. Wir haben bereits gezeigt, wie leicht der Schall durch gewebte Stoffe hindurchgeht[1]). Eine Schicht aus Leinwand oder Kattun, sogar aus dickem Flanell oder Fries, absorbirt nur einen kleinen Theil des Schalles von einer schwingenden Zunge. Eine solche Kattunschicht ist wie eine Luftschicht, die sich von ihrer Umgebung durch ihre Temperatur oder Feuchtigkeit unterscheidet; eine Reihe solcher Kattunschichten ist wie eine Reihe von Schichten aus ungleichartiger Luft.

Zwei Blechröhren MN und OP (Fig. 3, a. f. S.) mit offenen Enden werden spitzwinklig gegen einander aufgestellt. An dem Ende der einen Röhre befindet sich die schwingende Zunge r; gegenüber dem Ende der anderen, in der Verlängerung von PO die empfindliche Flamme f; endlich in der Verlängerung der Axe MN eine zweite empfindliche Flamme f'. Wenn die Zunge ertönt, versetzt der directe Schall durch MN die Flamme f' in Unruhe. Führt man die quadratische Kattunschicht ab unter einem passenden Winkel ein, so

[1]) Phil. Trans. 1874, I. Th., S. 208, und 7. Capitel dieses Buches.

nimmt die Wirkung auf f' etwas ab und das schwache Echo von ab versetzt die Flamme f in eine kaum merkliche Bewegung. Fügt man eine zweite Kattunschicht hinzu, so trifft der von ab durchgelassene Schall die Schicht cd, wird theilweise reflectirt, geht durch PO hindurch und versetzt

Fig. 3.



die Flamme f in stärkere Unruhe. Durch Hinzufügung einer dritten Schicht ef wird der reflectirte Schall noch mehr verstärkt. Je kräftiger das Echo wird, um so schwächer vibrirt die Flamme f', bis sie ganz zur Ruhe kommt.

Bei dünnem Kattun oder Battist bedarf es einer grösseren Anzahl von Schichten, um den ganzen Schall aufzuhalten; das Echo wird daher aus einer grösseren Entfernung zurückgesandt und dauert länger. Acht Kattunschichten, die dicht neben einander in einen Drahtrahmen eingespannt sind und eine Art Polster bilden, sind einer dichten akustischen Wolke vergleichbar. Wird ein solches Polster unter dem passenden Winkel vor N gebracht, so hält es den Schall, der sonst bis f' vordringt, derart auf, dass die Flamme f', wenn sie nicht allzu empfindlich ist, zur Ruhe kommt und f in viel stärkere Bewegung geräth als durch das Echo von einer einzelnen Schicht. Wäre die Schallquelle in unmittelbarer Nähe, so würde das Echo von einem solchen Polster unmerklich kurz sein. In Villejuif waren nun, meiner Vermuthung nach, die akustischen Wolken in unmittelbarer Nähe; deshalb war das Echo dort entsprechend kurz.

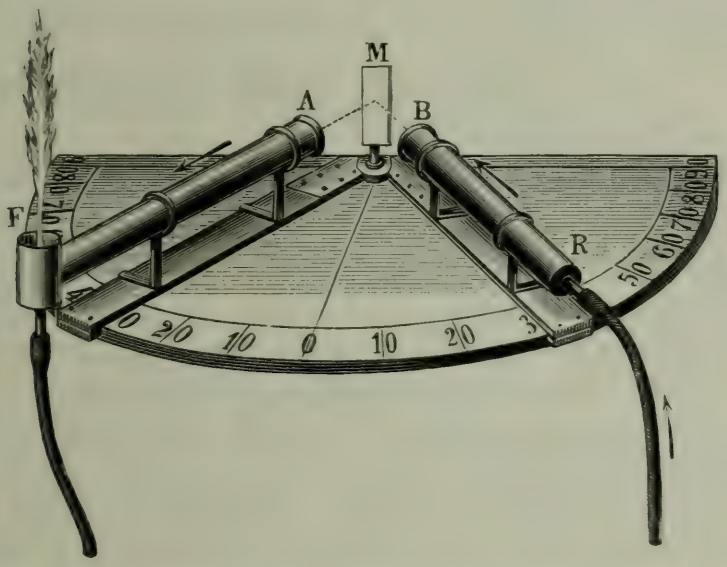
Die Analogie zwischen Licht und Schall führt hier noch einen Schritt weiter. Das Polster wirkt hauptsächlich durch innere Reflexion. Der Schall der Zungenpfeife ist zusammen-

gesetzt; er besteht aus partiellen Tönen von verschiedener Höhe. Wenn diese Töne in ihren ursprünglichen Verhältnissen von dem Polster reflectirt werden, so ist das Polster akustisch weiss; wenn sie mit veränderten Verhältnissen reflectirt werden, so ist das Polster akustisch farbig.

Bei diesen Versuchen leistete mir mein Assistent, Herr Cottrell, wesentlichen Beistand[1]).

Anmerkung, 3. Juni. — Ich lasse hier die Zeichnung eines Apparates folgen, der von Herrn Cottrell construirt und von den Mechanikern Tisley und Spiller gebaut ist.

Fig. 4.



Derselbe dient dazu, die Gesetze der Schallreflexion zu erläutern. Er besteht aus zwei Röhren (AF und BR) nebst einer Schallquelle am Ende R der einen und einer empfindlichen

---

[1]) Seit Obiges geschrieben wurde, liess ich den Schall durch 15 Kattunschichten hindurch gehen und durch dieselben Schichten wiederkehren; er war noch immer stark genug, um die Flamme in Unruhe zu versetzen. Später zeigte sich, dass der Schall durch 200 Tüllschichten drang; eine einzige Schicht durchnässten Kattuns hielt ihn auf.

Lord Rayleigh, für dessen Urtheil ich die grösste Hochachtung habe, zweifelt an der Richtigkeit meiner Erklärung des Arago'schen Berichtes. Wie dem auch sei, die oben mitgetheilten Thatsachen sind richtig und um ihretwillen mag die Arbeit stehen bleiben.

Flamme am Ende *F* der anderen. Die Axen der Röhren convergiren auf den Spiegel *M*, und die Röhren können verstellt werden, so dass sie jeden beliebigen Winkel einschliessen. Die Einfalls- und Reflexionswinkel werden von dem graduirten Halbkreis abgelesen. Der Spiegel *M* ist gleichfalls um eine verticale Axe beweglich.

Merkwürdige Beispiele von akustischer Undurchlässigkeit der Luft.

Folgenden Bericht von der Schlacht bei Gain's Farm verdanke ich dem Rector der Universität von Virginia:

Lynchburgh, Virginia, 19. Mai 1874.

Sehr geehrter Herr!

Soeben habe ich mit grossem Interesse Ihren Vortrag vom 16. Januar über akustische Durchlässigkeit und Undurchlässigkeit der Atmosphäre gelesen. Ihre merkwürdigen Beobachtungen veranlassen mich, Ihnen ein Erlebniss mitzutheilen, das ich wohl zuweilen erzählt habe, aber nie ohne die Befürchtung, dass ich keinen Glauben finden würde, wenn ich mich nicht unter guten Bekannten befand. Es hatte mir zur Zeit grossen Eindruck gemacht, blieb mir aber vollständig räthselhaft, bis Ihr Vortrag mir eine mögliche Lösung nahe legte.

Am Nachmittag des 20. Juni ritt ich mit General G. W. Randolph, damaligem Kriegsminister der Nord-Staaten, nach dem Price'schen Hause, etwa 14,5 km von Richmond. Am Abend des vorhergehenden Tages hatte General Lee seinen Angriff auf M'Clellan's Armee begonnen, indem er den Chikahominy ungefähr 6 km oberhalb des Price'schen Hauses überschritt und M'Clellan's rechten Flügel bedrängte. Die Schlacht bei Gain's Farm wurde an dem Nachmittag geschlagen, von dem ich schreibe. Das Chikahominythal ist von einem Bergrücken zum anderen ungefähr 2,4 km breit. Das Price'sche Haus liegt auf dem Richmond zunächst gelegenen Gipfel, Gain's Farm liegt

gerade gegenüber auf dem anderen Gipfel und erstreckt sich auf einem Plateau in der Richtung nach Cold Harbour.

Ich konnte quer über das Thal hinweg ziemlich viel von der Schlacht sehen. Lee's rechter Flügel stand im Thal, der linke Flügel der Conföderirten ebenfalls. Meine Augenlinie deckte sich beinahe mit der Schlachtlinie. Ich sah, wie die Conföderirten vorrückten, zwei oder drei Mal zurückgeschlagen wurden und sich in der Abenddämmerung schliesslich zurückzogen.

Ich sah deutlich das Gewehrfeuer beider Linien, den Rauch, die einzelnen Schüsse, das Aufblitzen der Geschütze. Ich sah berittene Batterien auf beiden Seiten ins Treffen rücken und rasch feuern. Auf beiden Seiten waren mehrere Feldbatterien deutlich in Sicht. Viele andere waren durch den Forst verdeckt, der das Gesichtsfeld begrenzte.

Aber obgleich wir ungefähr zwei Stunden lang, von 5 bis 7 Uhr an einem Sommerabend, einer Schlacht zusahen, an der mindestens 50000 Mann und sicher nicht weniger als 100 Geschütze activ betheiligt waren, und die Luft optisch so klar, wie möglich erschien, hörten General Randolph und ich von dem ganzen Geräusch der Schlacht nicht einen einzigen Ton. Ich drückte ihm zur Zeit mein Erstaunen darüber aus.

Zwischen uns und dem Schlachtfelde befand sich das tiefe, breite Chikahominythal, das, zum Theil ein Sumpf, durch Hügel und Wälder im Westen (der Seite, wo ich mich befand) vor der untergehenden Sonne geschützt war. Ein Theil des Thales auf beiden Seiten des Sumpfes war abgeholzt und stellenweise bebaut. Es waren also die geeigneten Bedingungen vorhanden für das Entstehen mehrerer Luftzonen von verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt (und wahrscheinlich verschiedener Temperatur), die in Schichten rechtwinklig zu den vom Schlachtfelde ausgehenden Schallwellen angeordnet waren.

Mit vorzüglicher Hochachtung

R. G. H. Kean.

Das Folgende ist Archibald Forbes' „Erlebnissen aus dem deutsch-französischen Kriege" entnommen:

„Am Morgen des 5., vor 10 Uhr, war die von dichtem Nebel getrübte Luft zugleich mit einem Geräusch erfüllt, dem man keinen rechten Namen geben konnte. . . . . Der nächste Morgen unterschied sich in jeder Weise vollständig von dem vorhergehenden. War der erste so kalt, dass Einem das Mark in den Knochen gefror und so trübe, dass man auf $^1/_2$ km nichts sehen konnte, so war der zweite klar, hell und warm wie ein später Märztag. Gestern war die Luft voll Geräusch, heute herrschte arkadische Stille, als ob kein Krieg wäre. Man sah sich staunend an. War Paris sammt seinen Befestigungen, Geschützen, dem Bombardement und Nichtbombardement der Ostseite spurlos verschwunden? . . . . Ich beschloss auf eigene Hand nachzusehen und ritt nach Montmorency, von wo aus die Ostseite von Paris sich als breites Panorama vor dem Beschauer ausbreitet. Noch immer war Alles todtenstill. . . . . Ich traf dort drei berittene Soldaten und wir unterhielten uns über die Lage der Dinge. Sie glaubten an einen Waffenstillstand, weil sie seit dem Morgen keinen Schuss vernommen hatten. Während wir sprachen, löste sich eine einzelne weisse Rauchwolke aus der grauen Wand von La Briche. Keine Detonation — nach dem Fehlen jeglichen Geräusches zu schliessen, hätte sie harmloser Dampf sein können..... Ich ging allein weiter nach Gonesse. Dort fand ich zu meinem Erstaunen die deutschen Batterien von Gonesse bis Sevran in vollster Action. Sie waren seit 8 Uhr Morgens im Gange. In Gonesse war man der Ansicht, das Feuern habe auf der Südseite zur selben Zeit begonnen; jedenfalls dauerte es noch fort. Dennoch hörte man in Margencey und Montmorency keinen Ton. Es kam alles von der Luft; heute leitete sie den Schall so schlecht, wie sie ihn gestern gut geleitet hatte. Sogar in Gonesse hörte man die Geschütze nicht, obgleich sie so zu sagen dicht neben uns donnerten."

Vom Herzog von Argyll erhielt ich folgende sehr interessante Mittheilungen über die Durchlässigkeit des Nebels für Schall. „Diese Thatsache", schreibt er, „ist mir seit lange dadurch bekannt, dass ich einen grossen Theil meines Lebens 6 km von der Stadt Greenock, jenseits des Firth, zugebracht habe. Es befinden sich dort sehr viele Schiffswerften. Ich bin nun gewöhnt, je nach dem Zustande der Luft, das Hämmern der Schiffsbauer in jedem beliebigen Grade der Deutlichkeit zu hören oder auch nicht zu hören; ich habe stets beobachtet, dass an ausserordentlich klaren Tagen, wenn man alle Masten und Spieren deutlich unterschied, fast kein Schall herüberdrang; wogegen an trüben, nebeligen Tagen, an denen man gar nichts sehen konnte, jeder Hammerschlag hörbar war, ja manchmal in unmittelbarer Nähe zu sein schien."

Herr George H. Hetling aus Fulham schreibt mir gleichfalls mit einer Ausführlichkeit, die keinen Zweifel zulässt, dass er die Geschütze von Portland in einer Entfernung von 70,8 km durch einen dichten Nebel gehört habe.

ALPHABETISCHES INHALTSVERZEICHNISS.

A.

Accorde, musikalische, 490.
Aeolsharfe, 143.
Akustische Durchlässigkeit der Luft bei dickem Nebel und tiefem Schnee, 385.
— Durchlässigkeit, Veränderlichkeit derselben, 359—360.
— Reversibilität, 522—532.
— Schatten, 350.
— Wolken, Echos von ihnen, 362.
Albans, St., Echo in der Kirche der Abtei, 22.
Amplitude, 14.
Arago, Bericht über die Schallgeschwindigkeit, 364, 522.
Argyll, Herzog von, Mittheilungen über akustische Durchlässigkeit des Nebels, 535.
Atmosphäre, ihre Einwirkung auf Schall, 409—412.
— Reflexion an atmosphärischer Luft, 372.

B.

Barry, Ph., Empfindliche Flamme 307.
Beazely, A., Abhandlung über Nebel, 338.
Bell'sches Telephon, Beschreibung, 237—239, 274.
Bell, Graham, Versuche mit intermittirenden Lichtstrahlen, 259.
Beugung des Schalles, 25, 27, Anmerkung.
— Explosion bei Erith, 26.
Bewegung, dem Gehirn durch die Nerven mitgetheilt, 1.
— tönende, s. Schall.
Biot, Fortpflanzung des Schalles durch leere Leitungsröhren, 16.
Börse, Echos auf der Gallerie der Pariser, 21.
Brechung des Schalles, 23.
Brenner, Fischschwanz- und Fledermaus-, Versuche mit, 296.
Brown, Beschreibung seiner Dampfsirene, 341.

C.

Chladni, Tonometer, 154—155.
— Versuche über die Schwingungsarten eines an beiden Enden freien Stabes, 160.
— Analyse der Schwingungen einer Stimmgabel, 162.
— Apparat, um Schwingungen sichtbar zu machen, 164.
— Erläuterung seiner Versuche, 166—168.
Clarinette, Töne der, 230.
Combinationstöne, Entdeckung der, 452.

Combinationstöne, Bedingungen ihres Entstehens, 452.
— Erläuterungen durch den Versuch, 454.
— Theorien von Young u. Helmholz, 458—460.
Conjugirte Spiegel, 18.
Consonante Intervalle in ihren Beziehungen zum menschlichen Ohre, 483.
Consonanz, musikalische, ihre Theorie, 474—475, 488—491.
— graphische Darstellung der, 488.
Corti'sche Fasern im Mechanismus des Ohres, 483—484.
Cottrell, Versuche mit tönenden Flammen, 327, Anmerkung.
— Versuch mit dem Echo an einer Flamme, 376, 377.
— Apparat zur Erläuterung der Gesetze der Schallreflexion, 531.

D.

Dampfsirene, Beschreibung, 341.
— das mächtigste Nebelsignal, 415.
Dämpfen, Reflexion des Schalles an, 371, 373.
Diatonische Scala, 491.
Differenztöne, 458.
Dissonanz, Ursache der, 485—488.
— graphische Darstellung der, 488—491.
Donkin, A. E., Apparat zur Zusammensetzung von Schwingungen, 509, 510.
Doppelsirene, 89.
Doppler, seine Theorie der farbigen Sterne, 92.
Douglass, Beleuchtung von Leuchtthürmen, 333.
— seine Ansicht über den Einfluss des Nebels auf Schall, 339.
Drähte, s. Saiten.
Duane, schallfreie Zonen, 448.
— Erklärung der von ihm beobachteten Erscheinungen, 450.
Dynamit, als Schallerzeuger dem Schiesspulver überlegen, 114.

E.

Echo, 20.
— Beispiele, 20—22.
— angebliches Wolken-, 364.
— Luft-, 364—368.
— an einer Flamme, 376—377.
Edison, Telephon, Beschreibung, 240—244, 274.
— Phonograph, Beschreibung, 245—248, 275.
Empfindliche Flamme, 293.
Erith, Wirkung der Explosion vom Jahre 1864 auf Dorf und Kirche von, 26.
Eustachische Röhre, die, 87—88.
— Methode zur Ausgleichung der Luft auf beiden Seiten des Trommelfelles, 88, 99.

F.

Faraday, Versuch mit Schallkräuselungen, 183.
Fistelstimme, Ursache der, 232.
Flammen, tönende, 277, 328.
— Reibungsrhythmus, 277.
— Wirkung einer umgebenden Röhre, 280, 328.
— singende, 279, 328.
— Rijkes, tönende, 285.
— Einwirkung übereinstimmender Töne auf singende, 294.
— Wirkung des Schalles auf freie, 293, 329.
— Einfluss der Tonhöhe, 302—304.

Flamme, ihre ungewöhnliche Empfindlichkeit als akustisches Reagens, 304.
— die Vocal-, 304.
— Entdeckung einer neuen empfindlichen, durch Ph. Barry, 307.
— Lord Rayleigh's empfindliche, 309.
— Echo an einer, 376.
— Wirkung von Schwebungen auf die, 434.
— Einwirkung von Schalllinsen auf die, 310.
Flöte, Töne der, 230.
Flüssigkeiten, Schallgeschwindigkeit in, 46.
— Fortpflanzung musikalischer Töne durch, 92.
— ihre Ausdehnung durch strahlende Wärme, 266.
— Beschaffenheit flüssiger Strahlen, 316.
— Einwirkung des Schalles auf flüssige Strahlen, 319.
— Plateau's Theorie von der Auflösung eines Flüssigkeitsstrahles in Tropfen, 320, 330, 519.
— Empfindlichkeit des flüssigen Strahles, 326.
Forbes, G., Apparat zum Nachweis von Sumpfgas, 206.
— Beobachtung eines Falles von akustischer Undurchlässigkeit, 534.
Foreland, South, Nebelsignal-Station, 340.
— — Nebel am, 397—399.

G.

Gains Farm, Bericht über die Schlacht bei, 532.
Galton, F., Untersuchungen über die Gehörgrenze, 86, Anmerkung.
Gase, Schallgeschwindigkeit in, 44.
Gase, ihre Ausdehnung durch strahlende Wärme, 260.
— Tabelle ihres Absorptionsvermögens, 263.
— das Erzeugen musikalischer Töne durch Dämpfe und, 266.
Gehörnerven, Zweck der, 2.
— Art, wie ihnen die Schallbewegung mitgetheilt wird, 2—3, 481—482.
Gehörs, Mechanismus des, 481.
Gehörsteine des Ohres, 482.
Geräusch, physikalischer Unterschied zwischen Musik und, 56, 97.
Gladstone, Dr., über die akustische Undurchlässigkeit von Nebel, 338.
Glasharmonika, 162.
Glocke im Vacuum, 7.
Gocken, Zerlegung der Schwingungen der, 177.
— Aenderung des Tones der, 393—394.

H.

Hagel, Zweifel, dass er den Schall aufhält, 381.
Harmonie, 465.
— Vorstellungen der Pythagoräer, 465, 511.
— Euler'sche Theorie, 466, 511.
— Einfluss der Obertöne auf die, 487.
— ihre Bedingungen, 466.
— graphische Darstellung der Consonanz und Dissonanz, 488—490.
Harmonische Töne einer Flamme, 288.
— — von Saiten, 135—140.
Hawksbee, Versuch mit tönendem Körper im Vacuum, 7.
Helmholtz, Theorie der Combinationstöne, 459.
— — der Consonanz, 469—472.

Henry, J., Dampfsirene für Leuchtthurmdienst, 341.
Herschel, Sir John, Citat aus seinem Artikel über Schall, 22.
— — Bericht über Arago's Beobachtungen über Schallgeschwindigkeit, 364.
Hetling, G. H., Beispiel der Durchlässigkeit des Nebels für Schall, 535.
Holz, Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in, 50.
— Durchgang musikalischer Töne durch, 93.
— Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in, 201.
Holzinstrument, 161.
Hooke, Robert, Vorahnung des Stethoskops, 50.
— — Erzeugung eines musikalischen Tones durch die Zähne eines rotirenden Rades, 60.
Horn, das, als Instrument für Nebelsignale, 346.
Hughes, Beschreibung seines Mikrophons, 244, 274.

I.

Interferenz der Schallwellen, 488, 462.
— Vernichtung eines Tones durch den anderen, 430, 462.
— Theorie der Schwebungen, 433, 463.
Intervalle, optische Erläuterung derselben, 499.

J.

Joule's Aequivalent, 42.
Jungfrau, Echo auf der, 21.

K.

Kaleidophon, Wheatstone's, Construction, 156.
Kanone, Ausbreitung des Schalles einer, für Nebelsignale, 347.
— der Sirene unterlegen, 412.
— ihre Nachtheile als Signal, 413.
Karte zur Erläuterung der Versuche über Nebelsignale, 344.
— — — des Einflusses der Schallschatten, 352.
Kerzenflamme, Empfindlichkeit einer, 293.
Klangfarbe, Definition, 135.
Klavier, die höchsten und tiefsten Töne auf dem, 85.
Klaviersaiten, Klang der, 142.
— Schwingungscurven, 144, 145.
Kluft von Dunloe, Echo in der 20.
Knotenpunkt, 111.
Knotenpunkte sind nicht ganz ohne Bewegung, 118.
— und Obertöne einer Stimmgabel, 163, 185.
— sichtbar gemacht, 162.
— der Ausgang einer Schwingungsbewegung, 256—257.
Kohlensäure, Geschwindigkeit des Schalles in. 44.
— Reflexion an, 369—371.
Körper, feste, Schallgeschwindigkeit in, 48.
— — Fortpflanzung musikalischer Töne durch, 92, 103.
— — Feststellung der Schallgeschwindigkeit in, 201.
Kundt, Aug., Versuche, 249.
Künstliche akustische Wolken, 379.
Künstlicher Nebel, Versuche mit, 400.

L.

Laplace, seine Verbesserung der Newton'schen Formel für die Schallgeschwindigkeit, 32.
Leconte, Beobachtungen über freie Flammen, 293.

Leconte, Einwirkung musikalischer Töne auf die Flamme eines Leuchtgasstrahles, 515—522.
Leuchtthurm, alter, bei Dover Castle, 332.
Leuchtthürme, verschiedene Lampenarten, 332—334.
— mit elektrischem Licht, 334, 336, Anmerkung.
— in Canada und den Vereinigten Staaten, 335.
Licht, Analogie zwischen Schall und, 16, 23.
— Analogie des Lichtes, 358.
Linsen, Brechung des Schalles durch, 23.
Lissajous' Methode, die Schwingungen einer Stimmgabel sichtbar zu machen, 70.
Luft, Fortpflanzung des Schalles durch die, 3.
— — — durch Luft von verschiedener Dichtigkeit, 12.
— ihre Elasticität und Dichtigkeit, 27.
— Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit, 28.
— durch den Schall verursachte Temperaturveränderungen, 33.
— Verhältniss der specifischen Wärmen bei constantem Druck und constantem Volumen, aus der Schallgeschwindigkeit abgeleitet, 38.
— mechanisches Aequivalent der Wärme, von diesem Verhältniss abgeleitet, 40.
— Schlussfolgerung, dass atmosphärische Luft kein merkliches Strahlungsvermögen besitzt, 43.
— Geschwindigkeit des Schalles in, 44.
— musikalische Töne durch Luftimpulse erzeugt, 65.
— verschiedene Mittel, um die Luft in periodische Bewegung zu versetzen, 68.
Luft, Reflexion durch erhitzte, 375.
— ihre Fähigkeit, die verschiedensten Eindrücke aufzunehmen und fortzupflanzen, 425.

M.

Manometer, das bei den Versuchen über die Absorption strahlender Wärme durch Gase benutzt wird, 260.
Mayer, Robert, seine Formel des Wärmeäquivalents, 41.
Meereswellen, Ursache des Geräusches der Strandwellen, 64, Anmerkung.
Melde, Versuch mit schwingenden Saiten, 124, 484.
— Versuch mit Tonkräuselungen, 182.
Metallen, Schallgeschwindigkeit in, 48.
— Feststellung der Schallgeschwindigkeit in, 201.
Mikrophon, 244.
Mitschwingen, das, 478.
— — in seinen Beziehungen zum menschlichen Ohre, 481.
Molecularstructur, ihr Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit, 49.
Monochord, 101.
Mundhöhle, Resonanz der, 235.
Musik, physikalischer Unterschied zwischen Geräusch und, 57, 97.
— der musikalische Ton wird durch periodische, Geräusch durch unperiodische Impulse erzeugt, 58, 97.
— Erzeugung musikalischer Töne durch Schläge, 60, 97.
— — durch Luftstösse, 65, 97.
— Höhe und Stärke musikalischer Töne, 67, 69—70, 97.
— Beschreibung der Sirene, 74.

Musik, Erklärung der Octave, 83.
— Beschreibung der Doppelsirene, 89.
— Fortpflanzung musikalischer Töne durch Flüssigkeiten und feste Körper, 92.
— Erzeugung musikalischer Töne durch Gase und Dämpfe, 266.
— musikalische Accorde, 490.
— die diatonische Scala, 491.
— s. auch Harmonie.
Musikalische Intervalle, optisch dargestellt, 498, 499.

N.

Nebel, theoretische Ursache seiner akustischen „Dunkelheit", 337.
— sein Unvermögen, den Schall aufzuhalten, 350.
— Beobachtungen in London, 390—396.
— künstlicher, Versuche, 400.
Nebelsignale im Nebel, 397—399.
— Untersuchungen über die akustische Durchlässigkeit der Atmosphäre in Beziehung zur Frage der, 332.
— Station für, am South Foreland, 340.
— Instrumente und Beobachtungen, 341.
— Verschiedenheit der Ausbreitung, 348—349.
— Einfluss des Schallschattens auf, 350.
— widersprechende Resultate, 355.
— Vorschlag zu einer Lösung der Widersprüche, 356.
— aussergewöhnliche Fälle akustischer Undurchlässigkeit, 356, 357, 532—535.
— bei Nebel, 396.
Nebelsignale, Nachtheile der Kanone, 413.
— geringste Ausbreitung, 416.
— richtige Aufstellung, 415.
Nerven des menschlichen Körpers theilen dem Gehirn Bewegung mit, 1.
—Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Eindrücke in den, 2, Anmerkung.
Newton, Sir Isaak, Berechnung der Schallgeschwindigkeit durch 31.

O.

Obertöne, Erklärung der, 135—137.
— Beziehung des geschnellten Punktes einer Saite zu den, 138.
— die den Schwingungen eines an beiden Enden befestigten Stabes entsprechen, 150.
— einer Stimmgabel, 163.
— sichtbar gemacht, 166.
— von längsschwingenden Stäben, 196.
— der Sirene, 471.
— ihr Einfluss auf die Harmonie, 487.
Octave, Erklärung der, 83.
Ohr, Grenzen des Gehörs, 84, 98.
— Ursachen künstlicher Taubheit, 87, 99.
— sein Mechanismus, 481—483.
— consonante Intervalle und ihre Beziehungen zum, 483.
Orgel, Schwingungen der tiefsten Töne der, 85, Anmerk.
Orgelpfeifen, 210, 250.
— Schwingungen gedackter Röhren, 212, 250.
— — der Pansflöte, 215.
— — offener Röhren, 215, 251.
— Zustand der Luft in offenen Röhren, 218, 251.

Orgelpfeifen, Zungen und Zungenpfeifen, 227.

P.

Pansflöte, die, 215.
Parabolische Spiegel, Versuche mit ihnen, 18.
Pfeifen als Nebelsignale, Ausdehnung ihres Schalles, 347.
— s. Orgelpfeifen.
Phonograph, Beschreibung, 245—249.
Plateau, seine Theorie von der Auflösung eines Flüssigkeitsstrahles in einzelne Tropfen, 320, 330, 519.
Platten, kreisförmige, Zerlegung ihrer Schwingungen, 174, 186.
Pythagoräer, ihre Vorstellungen von musikalischer Consonanz, 465, 511.

R.

Rauchstrahlen, Einwirkung musikalischer Töne auf, 314.
Rayleigh, Lord, empfindliche Flamme, 309.
Reflexion des Schalles, 16.
— an Gasen, 369.
— an der Luft, durch den Versuch nachgewiesen, 376.
Regen, angebliche Undurchlässigkeit für Schall, 381.
— künstlicher, seine Durchlässigkeit für Schall, 387.
Resonanz, 202.
— der Luft, 203, 271.
— von Leuchtgas, 206.
— der Mundhöhle, 235.
Resonanzböden, ihre Wirkung, 104, 105.
Resonatoren, 209.
Reversibilität des Schalles, 522—532.
Reynolds, O., Erklärung des Einflusses, den der Wind auf den Schall ausübt, 408.
— Ansicht üb. die akustische Undurchlässigkeit des Nebels, 340.
Rijke's tönende Flamme, 285.
Robinson, Prof., Erzeugung musikalischer Töne durch Luftstösse, 65.
— Dr., Zusammenfassung unserer Kenntnisse über Nebelsignale, 336.

S.

Saiten, Schwingung der, 100.
— Gesetze schwingender, 106.
— Zusammensetzung directer u. reflectirter Impulse, 110.
— stehende und fortschreitende Wellen, 111.
— Schwingungsknoten u. Bäuche, 112—114.
— ihre Eintheilung, 121.
— Melde's Versuche, 124.
— longitudinale und transversale Impulse, 126.
— Bestimmung der Schwingungsgesetze, 131, 147.
— harmonische Töne, 136—140, 148.
— Klangfarbe und Obertöne, 135, 148.
— Mischung der Obertöne mit Grundtönen, 40.
— Aeolsharfe, 143.
— Young's Versuche mit den Schwingungscurven von Klaviersaiten, 144.
— Longitudinalschwingungen von Drähten, 187.
— — eines an einem Ende befestigten Drahtes, 192.
— — eines an beiden Enden freien Drahtes, 194.
Savart's Versuche über den Einfluss von Schall auf Wasserstrahlen, 517.

Schaffgotsch, Graf, akustische Versuche mit Flammen, 290.
Schall, Erzeugung und Fortpflanzung, 2, 53.
— Versuche mit tönenden Körpern im luftleeren Raume, 7, 53.
— Dämpfung des Schalles durch Wasserstoffgas, 10.
— Wirkung des Wasserstoffs auf die Stimme, 11.
— seine Fortpflanzung durch Luft von veränderlicher Dichtigkeit, 12.
— verglichen mit Licht und strahlender Wärme, 16.
— Schwingungsamplitude einer Schallwelle, 14, 53, 58.
— seine Reflexion, 17, 53.
— angeblich von den Wolken reflectirt, 22.
— Brechung, 23, 53.
— Beugung, 25, 27, Anmerk.
— Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit, 27, 54.
— — der Dichtigkeit und Elasticität auf die Schallgeschwindigkeit, 28, 54.
— Feststellung seiner Fortpflanzungsgeschwindigkeit, 30, 55.
— Newton's Berechnung, 31, 55.
— Verbesserung der Newton'schen Formel durch Laplace, 32, 55.
— Veränderung der Temperatur durch die Schallwelle, 32.
— Verhältniss der specifischen Wärmen der Luft, von der Schallgeschwindigkeit abgeleitet, 38.
— mechanisches Wärmeäquivalent, von der Schallgeschwindigkeit abgeleitet, 40.
— Abwesenheit des Strahlungsvermögens der Luft, von der Schallgeschwindigkeit abgeleitet, 42.
Schall, Einfluss der Molecularstructur auf die Schallgeschwindigkeit, 49.
— physikalischer Unterschied zwischen Geräusch und Musik, 57.
— musikalische Töne periodische, Geräusche unperiodische Impulse, 58.
— Erzeugung musikalischer Töne durch Schläge, 60.
— — durch Luftstösse, 65.
— Höhe und Stärke musikalischer Töne, 67, 69—70.
— Schwingungen einer Stimmgabel, 68.
— Lissajous' Methode, die Schwingungen einer Stimmgabel sichtbar zu machen, 70.
— Beschreibung der Sirene und Feststellung der Wellenlänge, 74.
— Bestimmung der Schwingungsperiode, 79.
— der Länge der entsprechenden Schallwelle, 80.
— verschiedene Definitionen der Schwingung u. Wellenlänge, 81.
— Gehörgrenze, höchste und tiefste Töne, 84, 85, Anmerk.
— Doppelsirene, 89.
— Fortpflanzung musikalischer Töne durch Flüssigkeiten und feste Körper, 92—96.
— Sonometer oder Monochord, 101.
— Schwingungen der Saiten, 101.
— Wirkung des Resonanzbodens, 104. 105.
— Gesetze schwingender Saiten, 106.
— directe und reflectirte Impulse, 109.
— Schwingungsknoten u. Bäuche, 111.
— Anwendung der Ergebnisse auf die Schwingungen von Saiten, 120.

Schall, Melde's Versuche, 124, 484.
— Longitudinal- und Transversalschwingungen, 126.
— Schwingungsgesetze, 131, 146.
— harmonische Töne der Saiten, 135, 148.
— Erklärung der Klangfarbe und der Obertöne, 135, 148.
— Beziehungen der geschnellten Punkte einer Saite zu den Obertönen, 138.
— Schwingungen eines an beiden Enden befestigten Stabes, seine Unterabtheilungen und entsprechenden Obertöne, 150.
— — eines an einem Ende befestigten Stabes, 151.
— Chladni's Tonometer, 154.
— Wheatstone's Kaleidophon, 156, 184.
— Schwingungen eines an beiden Enden freien Stabes, 160, 185.
— Knotenpunkte und Obertöne einer Stimmgabel, 162—164, 185.
— — — sichtbar gemacht, 165, 185.
— Schwingungen quadratischer Platten, 166, 170, 185—186.
— — von kreisförmigen Platten und Glocken, 174, 177, 186.
— Kräuselungen im Wasser, 181, 186.
— Faraday's und Melde's Versuche mit Schallkräuselungen, 182, 183, 186.
— Längsschwingungen von Drähten, 187, 270.
— relative Schallgeschwindigkeit in Messing und Eisen, 189.
— Untersuchung schwingender Stäbe durch polarisirtes Licht, 198.
— Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in festen Körpern, 201.
— Verhältniss der Geschwindigkeit zur Tonhöhe, 201.
— Resonanz, 202, 271.
Schall, Resonanz der Luft, 204, 271.
— — des Leuchtgases, 206.
— Verstärkung einer Glocke durch Resonanz, 206.
— Verbrauch von Bewegung bei der Resonanz, 208.
— Anwendung der Resonanzgesetze auf Orgelpfeifen, 210—227.
— Zungen und Zungenpfeifen, 227—231.
— Beschreibung der Vocale, 233.
— Kundt's Versuche mit Klangfiguren innerhalb Röhren, 249.
— neue Methoden, die Schallgeschwindigkeit zu bestimmen, 252.
— Umsetzung strahlender Wärme in Schall, 259.
— Rijke's tönende Flamme, 285.
— harmonische Töne einer Flamme, 288.
— Wirkung äusserer Töne auf Flammen, 290.
— convergirende und divergirende Schalllinsen, 310.
— Einwirkung des Schalles auf senkrechte und schräge Strahlen, 323, 326.
— Ursachen, die den Durchgang des Schalles verhindern, 337.
— Wirkung des Nebels auf Schall, 337.
— widersprechende Ergebnisse des Signalisirens bei Nebelwetter, 355.
— Vorschlag zu einer Lösung dieser Widersprüche, 356.
— aussergewöhnliche Beispiele akustischer Undurchlässigkeit, 357, 532.
— Aufklärung derselben durch den Versuch, 529.
— starke Schwankungen der akustischen Durchlässigkeit, 359.

Schall, Echos von unsichtbaren akustischen Wolken, 362, 421.
— Arago's Bericht über die Schallgeschwindigkeit, 364.
— Luftechos, 366.
— Nachweis der Reflexion an Gasen, 369.
— Reflexion an Dämpfen, 373.
— — an erwärmter Luft, 376.
— Echo an einer Flamme, 377.
— Untersuchung über den Durchgang des Schalles durch die Atmosphäre, 381.
— Wirkung des Hagels und Regens, 382.
— — des Schnees, 384.
— Durchgang durch Gewebe, 386.
— — durch künstliche Regenschauer, 387.
— Wirkung des Nebels, 389.
— Aenderungen des Tones der Glocken, 390—396.
— Wirkung des Windes, 404.
— Atmosphärische Auswahl, 409.
— Gesetze der Schwingungsbewegung in Wasser und Luft, 423, 462.
— Superposition der Schwingungen, 324.
— Interferenz und Coincidenz der Schallwellen, 427—428, 462.
— Vernichtung eines Tones durch den anderen, 430, 462.
— Theorie der Schwebungen, 433, 463.
— Wirkung der Schwebungen auf eine Flamme, 434.
— optische Erläuterung der Schwebungen, 437, 463.
— Interferenz der Wellen einer schwingenden Scheibe, 443.
— — — einer Stimmgabel, 444.
— verschiedene Beispiele von Schwebungen, 445.
— Combinationstöne, 452, 464.
— — Bedingungen ihres Entstehens, 452.
Schall, Combinationstöne, Erläuterung durch den Versuch, 453.
— — Theorie von Helmholtz und Young, 458—460.
— — Differenz- und Summationstöne, 464.
— Verbindung musikalischer Töne, 465.
— das Mitschwingen, 478.
— Art, wie sich eine Tonwelle dem Hörnerven mittheilt, 482—487.
— Apparat zur Erläuterung der Gesetze der Schallreflexion, 531.
— Lärm der Schlacht nicht vernehmbar, 532.
Schallfiguren innerhalb Röhren, Kundt's Versuch über, 249, 254—255.
Schallfreie Zonen des Generals Duane, 448.
Schallgeschwindigkeit, Einfluss auf die Temperatur, 27.
— Einfluss der Dichtigkeit und Elasticität auf die, 28.
— Newton's Berechnung der, 31.
— in verschiedenen Gasen, 44.
— in Flüssigkeiten und festen Körpern, 46—50, 56.
— in Holz, 50, 56.
— relative, in Messing und Eisen, 189.
— ihr Verhältniss zur Tonhöhe, 201.
— abgeleitet von der Tonhöhe, 225.
— von durch Dämpfe erzeugten musikalischen Tönen, 269.
— durch Wasserdampf erzeugter Töne, 269.
Schallschatten, sein Einfluss, 350.
— erläuternde Karte, 352.
Schiessbaumwolle, als Schallerzeuger dem Pulver überlegen, 414.

Schnee, ein angebliches Hinderniss für den Durchgang des Schalles, 384.
Schultze's Hörhärchen im Mechanismus des Ohres, 482.
Schwebungen, ihr Einfluss bei Hornnebelsignalen, 348.
— Theorie der, 433.
— ihre Einwirkung auf Flammen, 434.
— sichtbar gemacht, 478.
— verschiedene Erläuterungen derselben, 446.
— ihre Beziehung zu den Corti'schen Fasern, 485.
— ihre Geschwindigkeit bewirkt Consonanz, 486.
— erzeugen Dissonanz, 490.
Schwingungen, einer Stimmgabel, 69.
— Methode, die, einer Stimmgabel sichtbar zu machen, 70.
— Erläuterung der Abhängigkeit der Tonhöhe von der Schwingungsperiode, 79.
— Bestimmung der Schwingungszahl durch die Sirene, 79.
— — der Länge der Tonwelle, 80, 98.
— verschiedene Definitionen, 81, 98.
— höchste und tiefste, der Orchesterinstrumente, der Orgel und des Klaviers, 85, Anmerk.
— der Saiten, 100.
— Gesetze schwingend. Saiten, 106.
— Erläuterung directer und reflectirter Impulse, 109.
— Anwendung des Ergebnisses auf die, musikalischer Saiten, 120.
— Melde's Versuch über das Schwingen von Saiten, 124.
— longitudinale und transversale Impulse, 126.
— eines rothglühenden Drahtes, 130.
— Gesetze, 131, 147.
— neue Methode, die Schwingungsgesetze zu bestimmen, 131.
Schwingungen, harmonische Töne der Saiten, 135, 148.
— eines an beiden Enden befestigten Stabes, seine Unterabtheilungen und Obertöne, 150.
— eines an einem Ende befestigten Stabes, 151.
— Chladni's Tonometer, 154.
— Wheatstone's Kaleidophon, 156.
— eines an beiden Enden freien Stabes, 160, 185.
— Knotenpunkte und Bäuche sichtbar gemacht, 163, 166, 185, 186.
— quadratischer Platten, 166, 170, 185.
— kreisförmiger Scheiben und der Glocken, 174, 177, 186.
— longitudinale von Drähten, 187.
— — — die an einem Ende befestigt sind, 192.
— — — die an beiden Enden frei sind, 194.
— Eintheilungen und Obertöne longitudinal schwingender Stäbe, 196.
— Untersuchung schwingender Stäbe durch polarisirtes Licht, 198.
— von Holzstäben, 201.
— von Luftsäulen, 203.
— gedackter Röhren, 212.
— offener Röhren, 215.
— Knotenpunkt der Ausgangspunkt einer Schwingungsbewegung, 256—257.
— Gesetze der Schwingungsbewegung in Luft und Wasser, 413.
— Superposition der, 427.
— Theorie der Schwebungen, 433.
— das Mitschwingen, 478.
— Lissajous' Methode, musikalische Schwingungen zu beobachten, 491.
— Apparat zur Zusammensetzung rechtwinkliger, 508.

Schwingungsbäuche, 111.
Schwingungsweite s. Amplitude.
Seewasser, Schallgeschwindigkeit in, 46.
Senkrechte Strahlen, Wirkung des Schalles auf, 322.
Sirene, Beschreibung der, 74.
— Beschreibung ihrer Töne, 78, 79.
— Bestimmung ihrer Schwingungszahl, 79.
— Dampf-, als Nebelsignal, 341.
— Doppel-, 89.
— Echos der, 367.
Sonometer s. Monochord.
Sorge, Entdeckung der Combinationstöne, 452.
Spieldose, Bau der, 155, 184.
Stab, Schwingungen eines an beiden Enden befestigten; seine Unterabtheilungen und entsprechenden Obertöne, 150, 184.
— Schwingungen eines an einem Ende befestigten, 151, 184.
— — eines an beiden Enden freien, 160, 185.
Stange, erwärmte, erzeugt musikalische Töne, 63.
— Untersuchung schwingender, durch polarisirtes Licht, 198.
Sterne, Doppler's Theorie der farbigen, 92.
Stethoskop, Hook's Vorahnung desselben, 50.
Stimme, menschliche, Wirkung des Wasserstoffs auf die, 11.
— Schallwellen der, 81.
— Beschreibung des Stimmorganes, 231.
— Ursache der Rauhheit bei Erkältungen, 232.
— — der Fistelstimme, 232.
— Joh. Müller's Nachahmung der Stimmbänder, 233.
— Bildung der Vocale, 233.
— Zusammensetzung der Vocaltöne, 235.
Stimmgabel, Schwingungen einer, 162.
— Lissajous' Methode, ihre Schwingungen sichtbar zu machen, 70.
— Saiten in Schwingung versetzt durch die, 124.
— Zerlegung der Schwingungen einer, durch Chladni, 162.
— Schwingungsknoten u. Bäuche der, 163, 185.
— Interferenz der Wellen einer, 444.
Stokes, seine Erklärung der Wirkung von Resonanzböden, 105.
— — — des Windes auf den Schall, 407.
Strahlende Wärme, ihre Umsetzung in Schall, 259.
— Ausdehnung von Gasen und Dämpfen durch, 360.
— rhythmische Absorption derselben, 266.
Strohfidel, Construction der, 162, 185.
Summationstöne, 459.
Sumpfgas, Apparat, um den Procentsatz von, in der Luft von Bergwerken nachzuweisen, 206.

T.

Tartini'sche Töne, 452.
Telephon, das Bell'sche, 237.
— das Edison'sche, 240.
Tisley, Apparat zur Zusammensetzung rechtwinkliger Schwingungen, 509.
Töpler, Versuch über die Schwingungsperiode der Flamme, 286.
Tonhöhe, 67.
— Nachweis, dass sie von der Schwingungsdauer abhängt, 78.
— Beziehungen der Geschwindigkeit zur, 201.
— Geschwindigkeit, abgeleitet aus der, 225.

Tonometer, Chladni's, 154.
Trompete als Nebelsignal, Ausbreitung ihres Schalles, 347.

V.

Violine, Construction, 104—105.
— Resonanzboden, der, 105.
— Eisen-, 155, 184.
Vocale, Bildung der, 233.
Vocalflamme, 304.
Vocaltöne, Zusammensetzung der, 235—236.

W.

Wärme, Temperaturschwankungen der Luft, durch Schallwellen erzeugt, 32, 33.
— Verhältniss der specifischen Wärmen bei constantem Druck und constantem Volumen, aus der Schallgeschwindigkeit abgeleitet, 38.
— das aus diesem Verhältniss abgeleitete mechanische Aequivalent der, 40.
— Beweis, dass die atmosphärische Luft kein merkliches Strahlungsvermögen besitzt, 42.
— musikalische Töne durch Wärme erzeugt, 63.
Warnung vor übergrossem Vertrauen auf Nebelsignale, 416.
Wasser, Schallgeschwindigkeit in, 46.
— Fortpflanzung musikalischer Töne durch, 92.
— Wirkung musikalischer Töne auf Wasserstrahlen, 317.
— Empfindlichkeit flüssiger Strahlen, 317.
— Theorie der Auflösung eines Flüssigkeitsstrahles in einzelne Tropfen, 320.
Wasser, Gesetze der Schwingungsbewegung in 423.
Wasserstoff, Dämpfung des Schalles durch, 8, 9.
— seine Wirkung auf die Stimme, 11.
— Schallgeschwindigkeit in, 28, 44.
Wasserwelle, stehende, 118.
Weber, Gebr., Untersuchungen über Wellenbewegung, 115.
Wellenbewegung, Illustration der, 109—114.
— stehende Wellen, 115.
— Gesetze der, 421.
Wellenlänge, Definition der, 73.
— Bestimmung der Länge einer Tonwelle, 80.
— Definition der Tonwelle, 81.
Wetterhorn, Echo von dem, 21.
Wheatstone, Kaleidophon, 156.
— Apparat zur Zusammensetzung rechtwinkliger Schwingungen, 508.
Wind, seine Wirkung auf den Schall, 404.
Wolken, Reflexion des Schalles von den, 22.
Woodstock Park, Echos im, 22.

Y.

Young, Thomas, Nachweis der Beziehungen des geschnellten Punktes einer Saite zu den Obertönen, 138.
— über die Schwingungscurven von Klaviersaiten, 144.
— Theorie der Combinationstöne, 458.

Z.

Zungen und Zungenpfeifen, 227.
— die Clarinette und Flöte, 230.

BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY
3 1197 20977 8494

HILLER
BOOKBINDING CO.
CLASS
A
LIBRARY BINDING
SALT LAKE CITY